

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра радиофизики

Направление «Прикладные математика и физика»



Влияние низкочастотного переменного магнитного поля на  
токораспределение в элементах главных цепей  
высоковольтных электрических аппаратов

Бакалаврская работа студента  
дневного отделения

**Белошейкина Даниила Владиславовича**

Научный руководитель:  
старший преподаватель, **Шапошников А.М.**

Рецензент:  
ведущий инженер ПГ «Таврида Электрик»  
**Лелеков М.С.**

Санкт-Петербург  
2017

## Оглавление

|  |    |
|--|----|
| 1. Введение .....  | 4  |
| 2. Обзор литературы .....  | 6  |
| 3. Цель и задачи работы .....  | 8  |
| 4. Методика моделирования и верификация результатов .....  | 9  |
| 4.1. Система уравнений .....   | 9  |
| 4.2. Метод моделирования на примере задачи с цилиндрическим проводником .....  | 10 |
| 4.2.1. Геометрия и сетка из конечных элементов.....  | 10 |
| 4.2.2. Свойства материалов .....   | 11 |
| 4.2.3. Граничные условия и выбор анализа .....   | 11 |
| 4.2.4. Анализ решения .....  | 11 |
| 4.3. Верификация результатов .....   | 14 |
| 4.4. Выводы .....  | 18 |
| 5. Асимметрия в распределениях плотности тока для несимметричных систем с двумя или тремя фазами.....  | 19 |
| 5.1. Две фазы.....   | 19 |
| 5.2. Три фазы .....  | 22 |
| 5.3. Выводы .....  | 23 |
| 6. Исследование влияния низкочастотного переменного тока на распределения токов в проводниках простой геометрической формы с учетом их взаимного влияния ..... | 24 |
| 6.1. Исследование взаимного влияния прямоугольных шин .....  | 24 |
| 6.1.1. Шины расположенные горизонтально .....  | 24 |
| 6.1.2. Шины расположенные вертикально .....  | 26 |
| 6.1.3. Пакеты из двух шин расположенных горизонтально и вертикально .....  | 28 |
| 6.1.4. Изменения сдвига по фазе и амплитуды тока .....   | 29 |
| 6.2. Исследование взаимного влияния цилиндрических проводников.....  | 32 |
| 6.3. Исследование влияния металлической оболочки на распределение тока в проводниках.....  | 34 |
| 6.4. Выводы .....  | 36 |
| 7. Исследование влияния низкочастотного переменного тока на распределения токов в современных высоковольтных электрических аппаратах.....                      | 37 |
| 7.1. Коммутационный модуль №1.....   | 37 |
| 7.1.1. Геометрия.....  | 37 |
| 7.1.2. Сетка .....   | 38 |
| 7.1.3. Граничные условия.....  | 39 |
| 7.1.4. Решение и результаты .....  | 39 |
| 7.2. Коммутационный модуль №2.....   | 41 |

|   |    |
|---|----|
| 7.2.1. Геометрия.....   | 41 |
| 7.2.2. Сетка .....  | 42 |
| 7.2.3. Решение и результаты .....   | 42 |
| 7.3. Выводы .....   | 44 |
| 8. Выводы .....   | 45 |
| 9. Список литературы .....  | 47 |
| Приложение 1 .....  | 48 |
| Коэффициенты увеличения сопротивления для шин, использующихся в разных аппаратах..... | 48 |

## 1. Введение

Большинство современных высоковольтных аппаратов работают на переменном токе промышленной частоты (ПЧ), 50 или 60 Гц. Используется трехфазная система электроснабжения, токи в каждой из фаз сдвинуты относительно друг друга на фазный угол  $120^\circ$ .

От низкого к высокому напряжению преобразуется при помощи трансформаторов, что важно, т.к. большие напряжения выгодно передавать с точки зрения джоулевых потерь. При применении переменного тока имеются потери, связанные с электромагнитным излучением и скин-эффектом. Скин-эффект – это явление, при котором ток вытесняется на поверхность проводника, т.к. вихревые токи у оси проводника текут против направления основного тока, а у поверхности – в том же направлении, что и основной ток. В результате неравномерного распределения тока по сечению проводника увеличивается эффективное сопротивление, что приводит к дополнительному нагреву. Глубина, на которой плотность тока уменьшается в  $e$  раз, называется скин-слоем и зависит от электропроводности и магнитных свойств материала. Возникающее вокруг проводника переменное магнитное поле индуцирует токи в соседних металлических конструкциях. Явление взаимного влияния проводников друг на друга называется эффектом близости.

В данной работе исследуются современные высоковольтные аппараты, например вакуумные выключатели (ВВ), основные составляющие которых схематически представлены на рис. 1а, а также комплектные распределительные устройства (КРУ) куда ВВ встраиваются (рис. 1б).

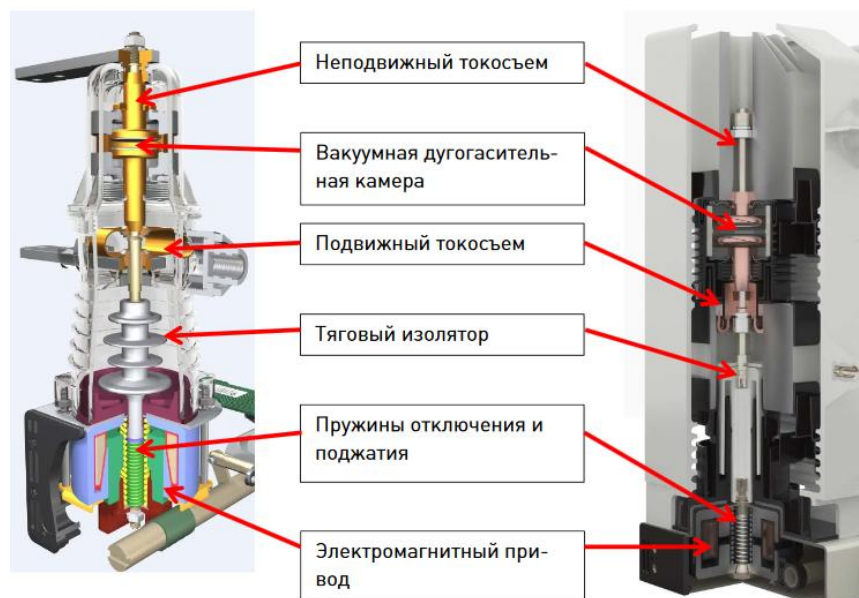
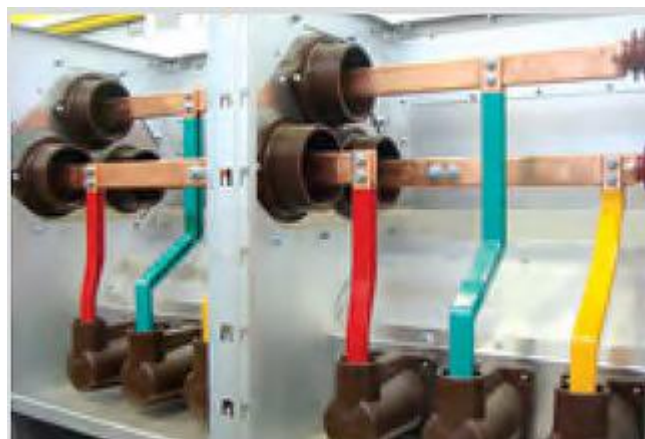
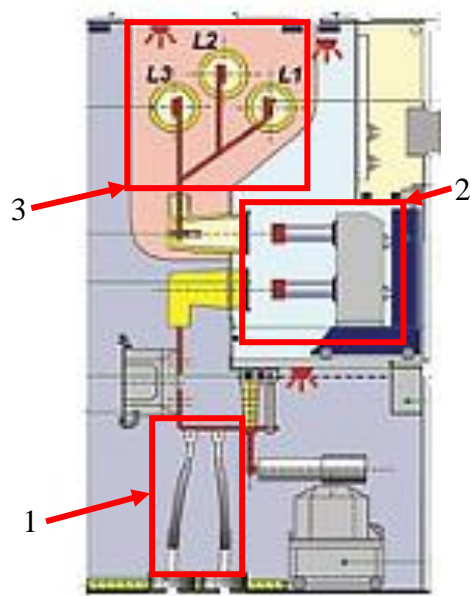


Рис. 1а. Разрез полюса коммутационного модуля ISM15\_LD\_1 (слева) и ISM15\_Shell\_2 (справа) промышленной группы «Таврида Электрик»



1 – высоковольтные кабели, 2 – коммутационный модуль, 3 – сборные шины

Рис. 16. Поперечное сечение KPU (слева) и отсек сборных шин KPU (справа) производства промышленной группы «Таврида Электрик»

В высоковольтных аппаратах для передачи тока используются шины. Сечение рассматриваемых в данной работе шин варьируется от 3х40 до 10х120 мм для номинальных токов от 400 А до 4000 А соответственно. Расчет и минимизация скин-эффекта в высоковольтных аппаратах и их шинах всегда были, будут и остаются актуальными, т.к. решение направлено на повышение качества систем электроснабжения на стадии проектирования. При протекающих номинальных токах, устройство должно удовлетворять стандарту ГОСТ 8024-90, устанавливающему нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний.

Аналитический расчет распределений тока является трудоемкой задачей, а для геометрически сложных проводников невозможен, поэтому в настоящее время используются численные методы решения задач, основанные на конечно-элементном моделировании. В связи с этим цель данной работы можно сформулировать следующим образом: оценить влияние скин-эффекта и эффекта близости на распределение тока в токопроводящих конструкциях при использовании средств конечно-элементного моделирования. В данной работе полученный результат для проводников различной геометрической формы сравнивается с экспериментальными и расчетными данными, приведенными в научной литературе.

Результаты данной работы могут выступать в роли рекомендаций для проектирования высоковольтных аппаратов. В работе на примере проводников простой геометрической формы (прямоугольные и цилиндрические) подробно исследуются явления скин-эффекта и эффекта близости, и анализ полученных результатов.

## 2. Обзор литературы

Описание скин-эффекта и его аналитический расчет для цилиндрического проводника приводится в [1]. В работе [2] демонстрируется суть скин-эффекта и эффекта близости, приводятся результаты расчета и эксперимента для шин различного сечения. В [2] представлен график с температурами перегрева для трехфазной системы шин (рис. 2). На каждой фазе по четыре шины 80х6 мм, расположение – вертикально. Межфазное расстояние - 60 мм, зазор между полосами шин одной фазы - 6 мм. В ходе эксперимента описанного в работе [2] получен нетривиальный результат, заключающийся в асимметричном перегреве крайних фаз. Причиной асимметричного нагрева, который демонстрируется на рис. 2, является скин-эффект и эффект близости согласно работе [2]. Авторы данной работы дают качественное, общее описание наблюдаемого явления.

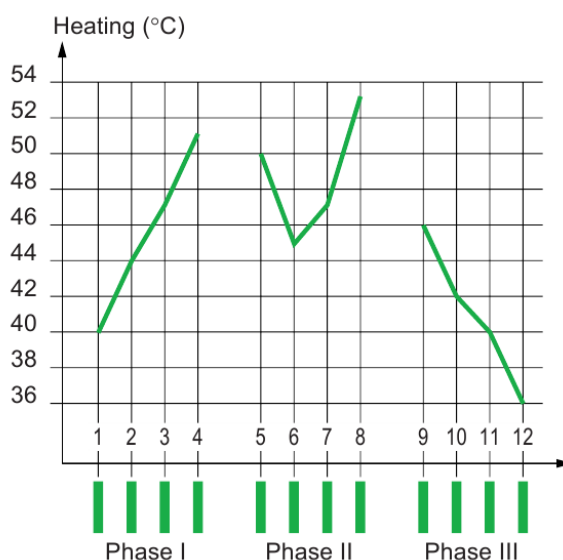


Рис. 2. Перегревы в трехфазной системе шин из [2]

Полученный в [2] экспериментальный результат верифицируется численным образом в работе [3]. В работах [4]-[8] авторы проводили аналогичные исследования, используя конечно-элементные модели. В [9] исследуется асимметрия в нагреве шин, и приводятся данные приближенных аналитических расчетов. В научных статьях [10] и [11] рассматриваются те же процессы для цилиндрических проводников.

В большинстве проанализированных работ рассматриваются случаи проводников простой геометрической формы. В статье [12] выполнен комплексный магнитный и температурный анализ в шинах подключения КРУ (рис. 3). На рисунке 3 контурными линиями изображены линии тока

воздуха (цветом изображена скорость воздушного потока), а также приведено распределение температуры по элементам главной цепи КРУ.

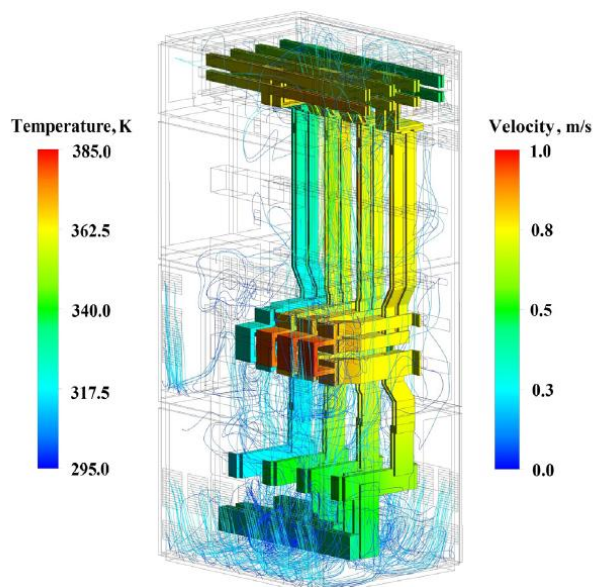


Рис. 3. Результаты расчета в [12]

В работе [12] были получены температуры перегрева для каждой из фаз в результате решения связанной магнитной и температурной задачи, решена сложная комплексная задача и получено приемлемое соответствие с экспериментальными данными. В [12] нет полного обоснования наблюдаемого эффекта, объяснение которого является теоретически значимой задачей.

В итоге:

- Решено множество задач с проводниками прямоугольного и круглого сечения, представлены распределения магнитных полей и плотностей тока для разных случаев.
- В статьях [5], [6] и [8] введены и посчитаны такие величины как коэффициент увеличения мощности на переменном токе относительно постоянного, что является интегральной характеристикой скин-эффекта и эффекта близости.
- В перечисленных статьях не объясняется в полной мере эффект асимметричного распределения токов и, как следствие, температур для трехфазных систем.
- В работе [12] решена ресурсоемкая и сложная задача без подробного анализа полученных результатов.
- Перечисленные труды содержат много необходимой информации по данному вопросу, но не до конца описывают процессы, происходящие в трехфазных системах

с переменным током. Это говорит о том, что данная тема, хоть и является широко освещенной, остается актуальной.

- Актуальность данной работы также заключается в том, что в ней исследуется скин-эффект и эффект близости в КМ. Как правило, высоковольтные аппараты проходят испытания на электропрочность, механический ресурс конструкции и нагрев. Поверхностные магнитные эффекты оказывают влияние на нагрев высоковольтного аппарата, но при расчете охлаждения влияние скин-эффекта и эффекта близости не учитывается.

### **3. Цель и задачи работы**

Цель данной работы - оценить влияние скин-эффекта и эффекта близости в токопроводящих конструкциях на распределение тока и дать рекомендации по способу учета скин-эффекта на стадии проектирования высоковольтных аппаратов.

Задача делится на несколько частей:

1. Построение методики моделирования, верификация результатов.
2. Исследование влияния низкочастотного переменного тока на распределения токов в проводниках простой геометрической формы с учетом их взаимного влияния.
  - Исследование взаимного влияния прямоугольных шин различного сечения, расположенных горизонтально и вертикально, при различных межцентровых расстояниях при протекании трехфазного переменного тока.
  - Исследование взаимного влияния цилиндрических проводников.
  - Исследование влияния металлических оболочек на распределение токов в шинах.
3. Определение скин-эффекта и эффекта близости в главной токопроводящей цепи современных коммутационных модулей на примере аппаратов промышленной группы «Таврида Электрик» (ПГ ТЭ).
  - Расчет коэффициентов увеличения сопротивления элементов главных цепей коммутационных модулей (КМ).



## 4. Методика моделирования и верификация результатов

### 4.1. Система уравнений

В качестве основного расчетного инструмента используется компьютерное моделирование. Фактически, решаются уравнения (1)-(5) методом конечных элементов.

$$\operatorname{rot}(\mathbf{E}) = -\frac{d\mathbf{B}}{dt} \quad (1)$$

$$\operatorname{rot}(\mathbf{H}) = \mathbf{j}_e + \mathbf{j}_i \quad (2)$$

$$\operatorname{rot}(\mathbf{A}) = \mathbf{B} \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H} \quad (4)$$

$$\mathbf{j}_i = \sigma\mathbf{E} \quad (5)$$

Где:

$\mathbf{E}$  - напряженность электрического вихревого поля,  $\mathbf{B}$  - индукция магнитного поля,  $\mathbf{H}$  - напряженность магнитного поля,  $\mathbf{j}_i$  - плотность индуцированного электрического тока,  $\mathbf{j}_e$  – плотность тока от внешних источников,  $\mathbf{A}$  - векторный потенциал,  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость материала,  $\varepsilon_0$  - электрическая постоянная,  $\mu$  - магнитная проницаемость,  $\mu_0$  - магнитная постоянная,  $\sigma$  - электропроводность материала.

Задача решается в линейной постановке, т.к. связь между  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{H}$  линейна и коэффициентом пропорциональности выступает магнитная проницаемость. Значение магнитной индукции в исследуемых задачах не превышает величин характерных для линейного участка ВН-кривой стали, из которой изготовлены оболочки КРУ (сталь А10 с противокоррозионным покрытием).

В данной работе не будет проводиться температурный анализ и учитываться нагрев проводников, как в [3], [4], [7], [8] и [12]. Будут анализироваться распределения токов и магнитных полей, которые и являются причиной нагрева.

## 4.2. Метод моделирования на примере задачи с цилиндрическим проводником

### 4.2.1. Геометрия и сетка из конечных элементов

Для построения и решения конечно-элементной модели используется программный пакет COMSOL Multiphysics, в частности один из его модулей - magnetic fields (mf). Моделируется цилиндрический проводник радиусом  $r=4$  (см) в 2D-постановке (рис. 4)

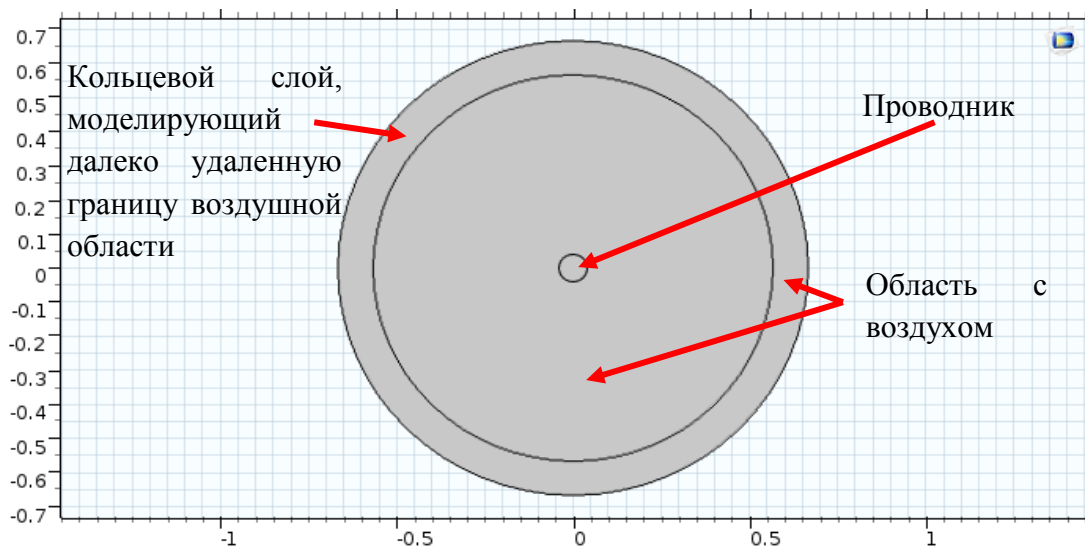


Рис. 4. Геометрия цилиндрического проводника

Все области разбиваются на сетку из конечных элементов (рис. 5). В данной задаче строится неупорядоченная сетка, т.к. этого достаточно для корректного решения задачи.

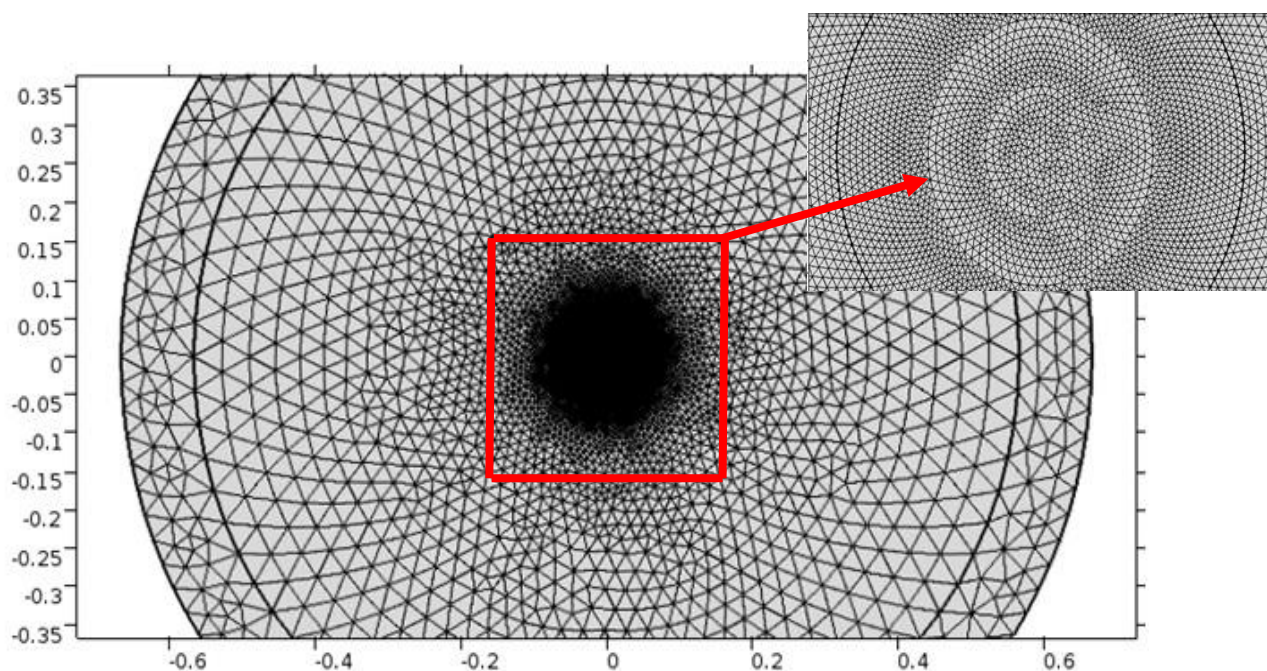


Рис. 5. Сетка из конечных элементов

#### 4.2.2. Свойства материалов

Медный цилиндрический проводник:  $\mu = 1$ ,  $\rho = 1.68 \cdot 10^{-8}$  (Ом · м), где  $\rho = \frac{1}{\sigma}$  - удельное сопротивление материала.

Воздух:  $\mu = 1$  и  $\sigma = 0$   $\left(\frac{\text{См}}{\text{м}}\right)$ .

#### 4.2.3. Граничные условия и выбор анализа

Условие на границе воздуха:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0, \text{ где } \mathbf{n} - \text{вектор нормали} \quad (6)$$

(6) соответствует условию того, что магнитное поле касательно к границе воздуха и нормальная компонента поля равна нулю.

На цилиндр задается ток 1 А, здесь и далее будет рассматриваться переменный ток промышленной частоты 50 Гц (ПЧ).

Прежде всего, следует пояснить следующие термины:

- Стационарная задача – статическая задача, в которой рассматривается установившийся процесс, и нет зависимости от времени.
- Переходная задача – задача с учетом переходных процессов.
- Гармоническая задача – квазистатическая задача, в которой временной анализ переходит в частотный с помощью замены:  $E = \hat{E} \cdot e^{i\omega t}$ , где  $\omega$  – частота, а  $\hat{E}$  – комплексная амплитуда и может быть расписана как  $\hat{E} = E_a \cdot e^{i\varphi}$ , где  $E_a$  – амплитудное значение напряженности электрического поля, а  $\varphi$  – фазный угол.

Для решения поставленной задачи следует использовать переходной анализ, но в исследуемых задачах рассматриваются материалы с линейными свойствами и переменный синусоидальный ток с фиксированной частотой 50 Гц. Поэтому менее ресурсоемким будет решение гармонической задачи, которая позволит описывать скин-эффект в линейной постановке (уравнение (4)).

#### 4.2.4. Анализ решения

Наибольший интерес представляет распределение плотности тока по сечению проводника (рис. 6), иллюстрирующее суть скин-эффекта.

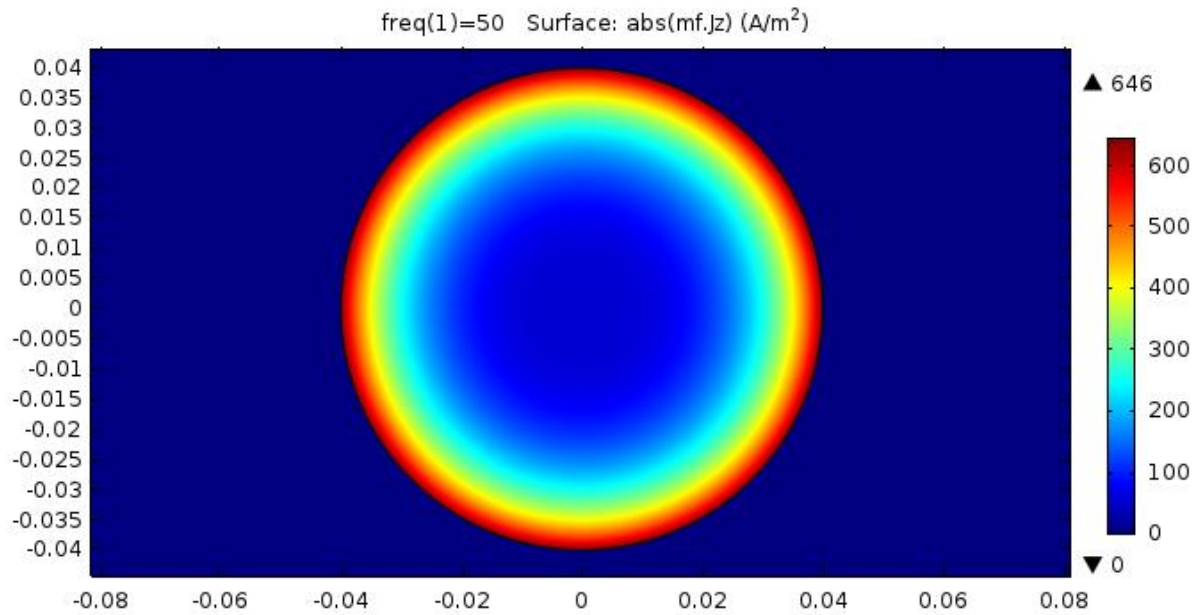


Рис. 6. Распределение модуля плотности тока

Ток распределен неравномерно по сечению проводника, а концентрируется на его периферии. Удобно сравнивать выделяемые в проводнике мощности при постоянном и переменном токе:

$$P_{DC} = I^2 \cdot R \quad (7)$$

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (8)$$

$$P_{AC} = \iiint \rho \cdot j^2 dV \quad (9)$$

$$k_R = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad (10)$$

Где:  $P_{DC}$  - мощность на постоянном токе,  $I$  – сила тока,  $R$  - сопротивление проводника,  $\rho$  – удельное сопротивление материала из которого изготовлен проводник,  $l$  - длина проводника (в 2D постановке величины рассчитываются на единицу длины, т.е. на 1 м),  $S$  - площадь поперечного сечения,  $P_{AC}$  - мощность на переменном токе,  $j$  - плотность тока,  $dV$  - элементарный объем,  $k_R$  – коэффициент увеличения сопротивления.

Для количественной характеристики возникающего скин-эффекта используется формула (10), показывающая, насколько увеличилось эффективное сопротивление проводника.

Для этой задачи  $k_R = 2.44$ . Для того чтобы понять насколько сильно ток вытесняется на периферию проводника можно посчитать толщину скин-слоя по приближенной формуле (11).

$$\delta \approx c \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \rho}{\mu \omega}} \quad (11)$$

Где  $\delta$  - толщина скин-слоя,  $c$  – скорость света,  $\mu$  – магнитная проницаемость,  $\omega$  – частота,  $\rho$  - удельное сопротивление материала,  $\varepsilon_0$  - электрическая постоянная.

Т.о. для данной задачи:  $\delta \approx 9.2$  (мм). Из более точных расчетов толщина скин-слоя для меди равна 9.33 (мм).

Для цилиндрического проводника существует аналитическое решение: (12) и (13).

$$k = \sqrt{\frac{-i\omega\mu}{\rho}} = \frac{1-i}{\delta} \quad (12)$$

$$J_r = \frac{kI}{2\pi R} \cdot \frac{J_0(kr)}{J_1(kR)} \quad (13)$$

Где:

$k$  – волновое число,  $i$  – мнимая единица,  $\omega$  – циклическая частота,  $\mu$  - магнитная проницаемость,  $\rho$  - удельное сопротивление,  $\delta$  - толщина скин-слоя,  $J_r$  - плотность тока на расстоянии  $r$  от оси проводника,  $I$  - полный ток в проводнике,  $R$  - радиус проводника,  $J_0$  - функция Бесселя первого рода нулевого порядка,  $J_1$  - функция Бесселя первого рода первого порядка.

Вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр проводника, строится модуль плотности тока (рис. 7а, 7б). Нагляднее строить плотность тока в относительных единицах, т.е. относительно постоянного тока, распределенного равномерно. На одном графике приведена плотность тока, рассчитанная в моделировании и аналитически.

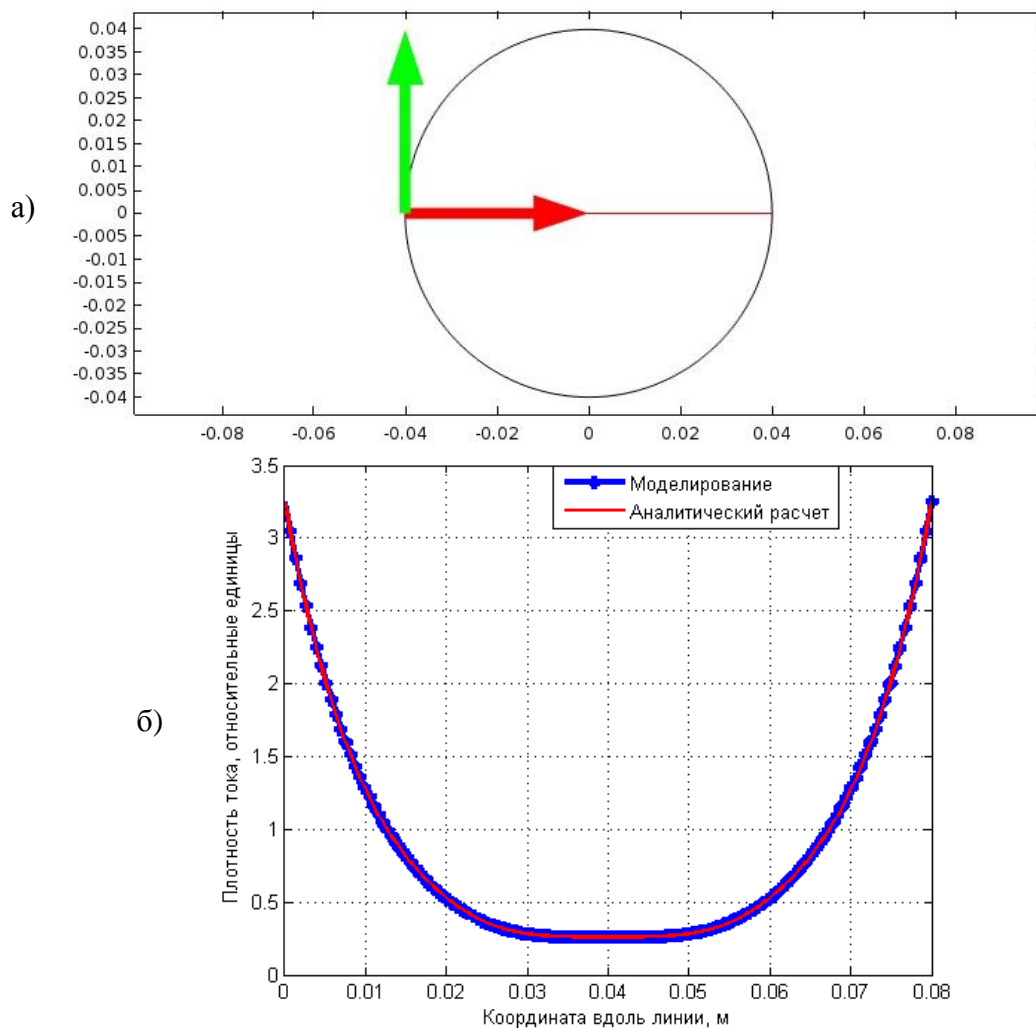


Рис. 7. а) линия, вдоль которой строится плотность тока, б) график зависимости плотности тока от координат вдоль линии

### 4.3. Верификация результатов

В данном параграфе производится сравнение результатов моделирования с исследованиями, описанными в научной литературе. Сначала рассматривается задача аналогичная предыдущей, отличающаяся лишь геометрической формой проводника. Вместо цилиндрического проводника будет рассматриваться прямоугольная шина сечением 10x100 мм. Такая же задача рассматривалась в работе [2], с которой и будет сравниваться результат моделирования. Как и в предыдущем параграфе, для наглядного описания скин-эффекта выводится плотность тока вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр шины, и на том же графике строится зависимость, полученная в [2].

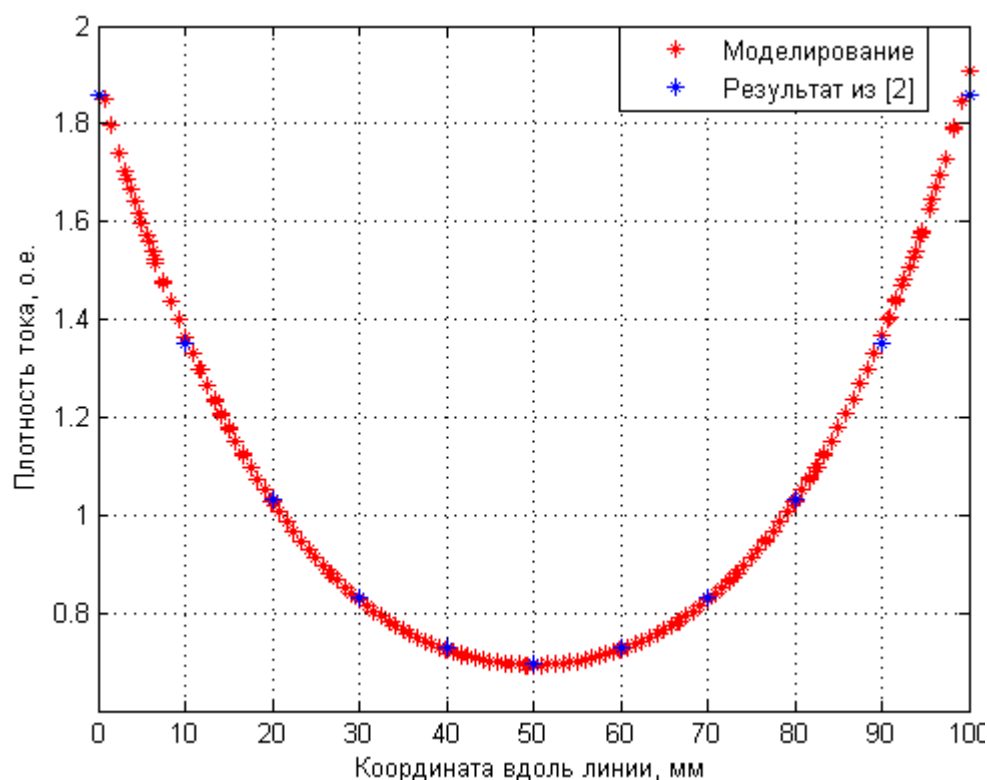
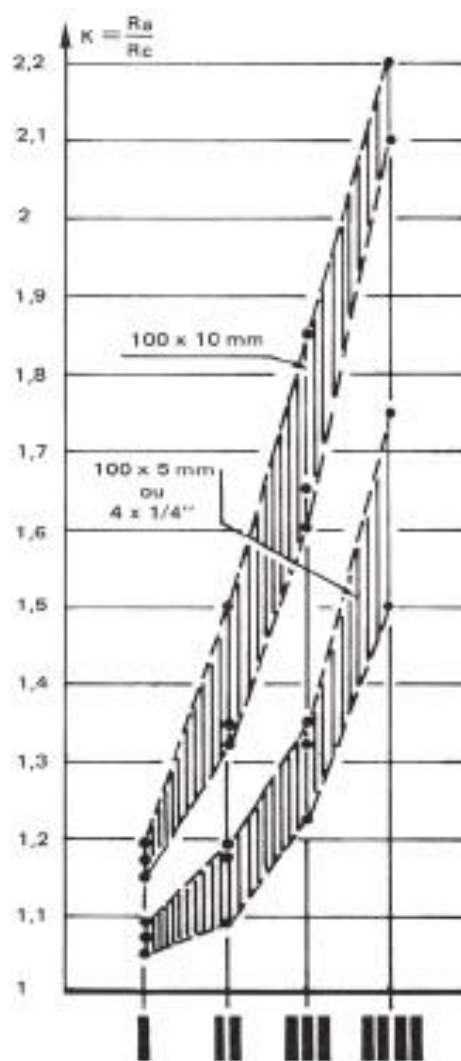
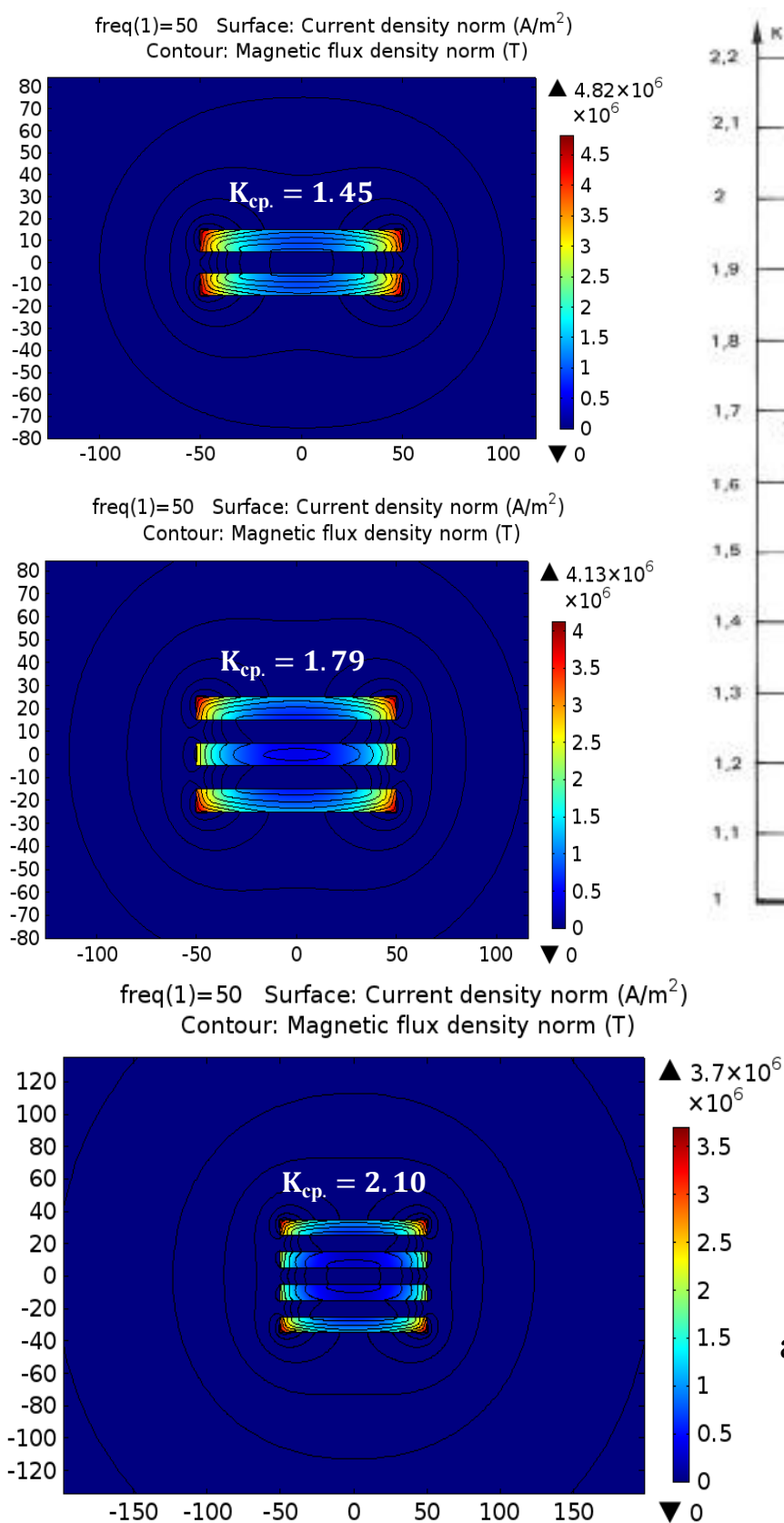


Рис. 8. График зависимости плотности тока от координаты вдоль линии

Полученные значения в моделировании и работе [2] совпадают. Коэффициент увеличения сопротивления в этом случае равен:  $k_R = 1.2$ .

Если требуется передавать большие токи, в качестве токоведущего элемента используют не одну шину, а несколько – пакет шин. Чаще всего встречаются пакеты из двух, трех или иногда четырех шин. В статье [2] приводится график, по которому приблизительно можно определить коэффициент увеличения сопротивления в зависимости от количества шин в пакете (рис. 9б). Далее будут представлены результаты для пакетов из двух, трех и четырех шин. Как и в предыдущей задаче, использовались шины 10x100 мм с расстоянием 10 мм между шинами в пакете.

На рис. 9а представлены распределения плотности тока, контурные линии магнитных полей (черным цветом), а также рассчитанные коэффициенты увеличения сопротивлений для каждого случая.



б)

а)

Рис. 9. а) распределения модулей плотностей токов, модулей магнитной индукции (черные изолинии, контурные линии) и значения коэффициентов увеличения сопротивления в моделировании, б) значения коэффициентов из [2]

Полученные в моделировании значения попадают в диапазоны значений из работы [2].



Далее в работе исследуются трехфазные системы. Рассматривается геометрия, исследованная в работе [11]. В ней моделировалось три цилиндрических электрода с проводимостью  $\sigma = 30000$  (С/м) и диаметрами 1.25 м, расположенные в вершинах равностороннего треугольника (рис. 10).

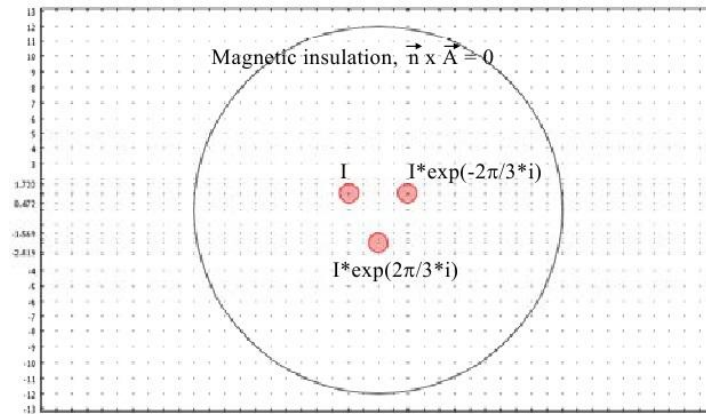


Рис. 10. Геометрия и граничные условия из [11]

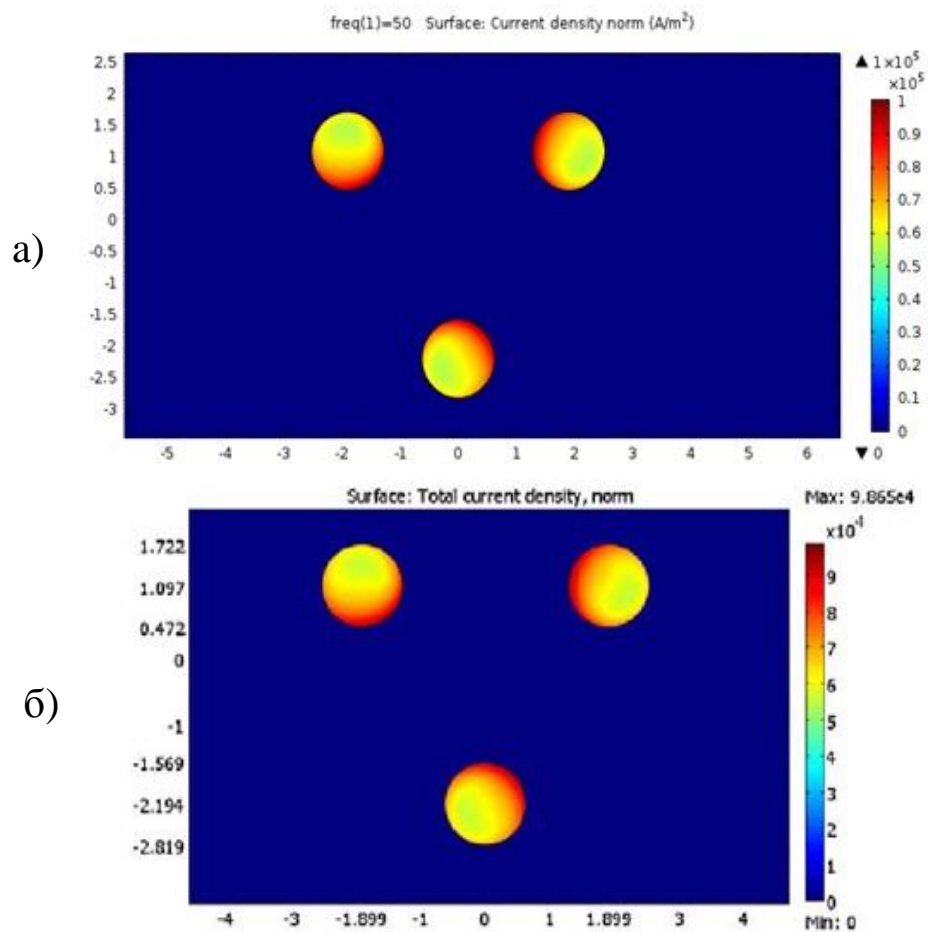


Рис. 11. Распределения модуля плотности тока а) полученные в моделировании, б) взятые из [11]

Распределения, полученные при моделировании (см. рис. 11) и из [11] совпадают с хорошей точностью, отличия в максимумах модуля плотности тока составляют  $\approx 1\%$ .

#### **4.4. Выводы**

В данной главе был изложен метод моделирования протекания переменного тока частотой 50 Гц, заключающийся в конечно-элементном моделировании скин-эффекта и эффекта близости в линейной 2D постановке с использованием гармонического анализа. По результатам решения рассчитываются коэффициенты увеличения сопротивлений, как количественная характеристика скин-эффекта, приводятся распределения модуля плотности тока и магнитной индукции, как качественная характеристика.

Для верификации моделирования, было рассмотрено несколько задач описанных в научных статьях:

- Одиночная шина 100x10 мм.
- Пакеты из двух, трех и четырех шин 10x100 мм.
- Три цилиндрических проводника диаметрами 1.25 м с током, сдвинутым по фазе на  $120^\circ$ .

## 5. Асимметрия в распределениях плотности тока для несимметричных систем с двумя или тремя фазами

Прежде чем перейти к рассмотрению различных конфигураций шин, стоит подробнее разобраться в получаемых распределениях и объяснить их. В начале главы 2 настоящей работы был представлен результат эксперимента, описанного в [2] (рис. 2). В случае трех фаз со сдвигом на  $120^\circ$ , нагрев крайних шин неодинаков, кроме того в центральном пакете шин перегревы крайних также различны. Это происходит из-за эффекта близости между проводниками. Объяснить его удобнее на более простой модели, рассматриваемой в работе [9], где исследуются системы из двух и трех цилиндрических проводников.

### 5.1. Две фазы

Для начала рассматривается система из двух цилиндрических проводников радиусами 2 см с расстоянием между ними 10 см. На них задаются токи 1 А с частотой 50 Гц сдвинутые относительно друг друга на  $180^\circ$ . Для определенности на левом проводнике начальная фаза будет  $0^\circ$ , а на правом  $180^\circ$ . В такой постановке асимметрии в распределениях быть не должно.

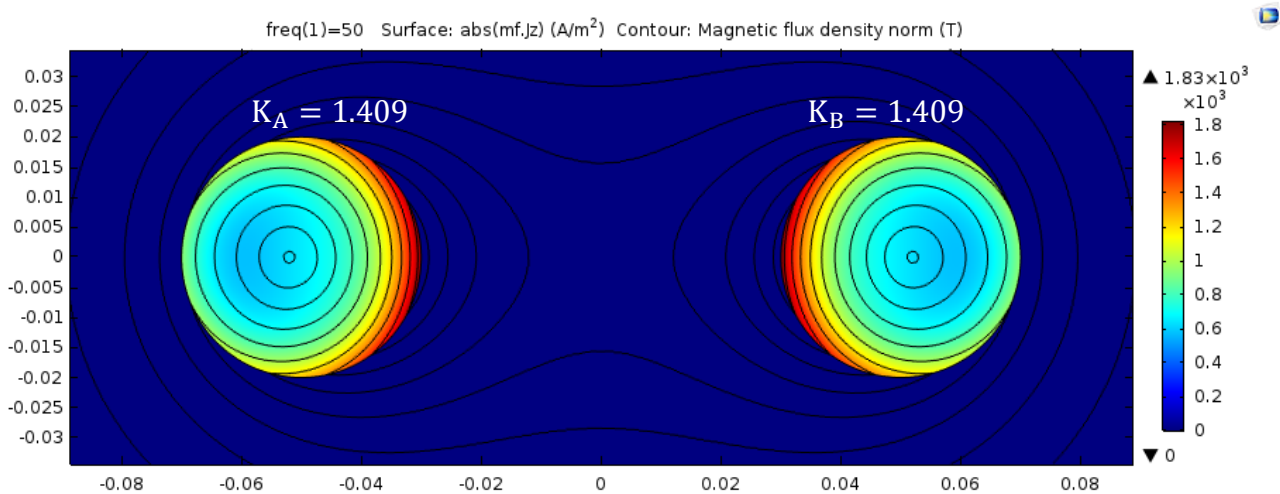


Рис. 12. Распределение модуля плотности тока (цвет), контурные линии модуля магнитной индукции (черные контурные линии) и коэффициенты увеличения сопротивлений

Распределения модуля плотности тока на рис. 12 для обоих проводников симметричны, т.к. постановка задачи также симметрична. Симметричность задачи следует из того, что разница фаз между каждым из проводников одинакова. Наглядной качественной характеристикой могут выступать векторные диаграммы полных токов, которые показывают, как индуцируются токи в проводниках (см. рис. 13). На данных диаграммах угол на фазовой плоскости для каждого

проводника отсчитывается в его собственной системе отсчета, относительно горизонтальной оси, против часовой стрелки.

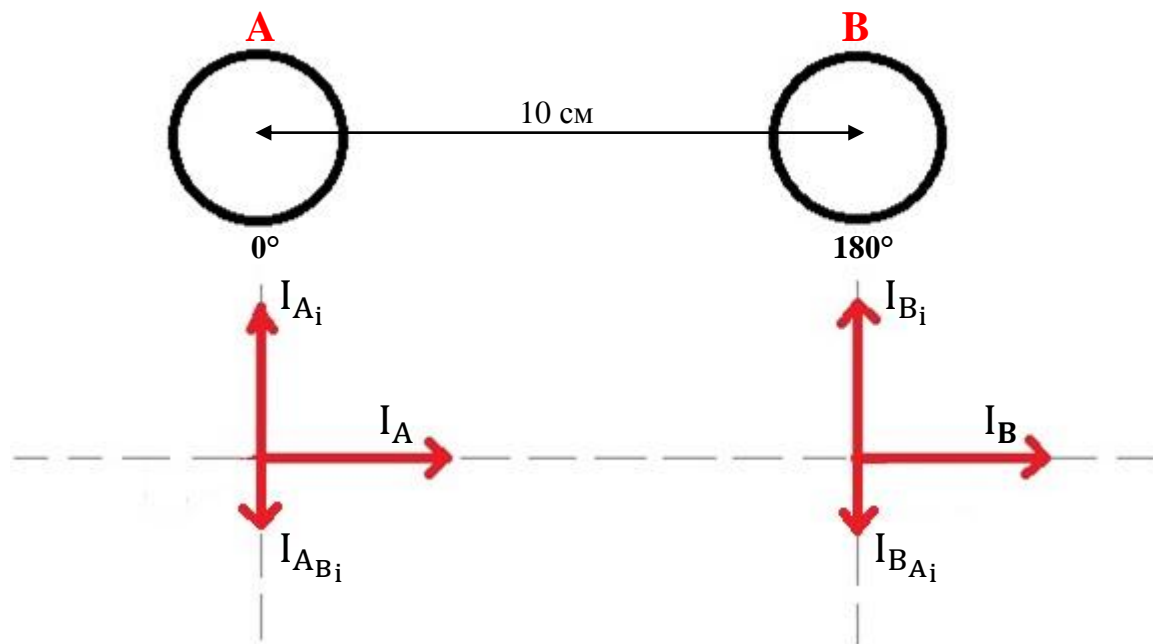


Рис. 13. Векторная диаграмма токов сдвинутых по фазе на  $180^\circ$

Здесь введены следующие обозначения: А – фаза с начальным фазовым углом  $0^\circ$ , В – фаза с начальным фазовым углом  $120^\circ$ ,  $I_A$  – ток, задаваемый на фазе А,  $I_{A_i}$  – ток на фазе А индуцированный собственным магнитным полем,  $I_{A_{B_i}}$  – ток на фазе А индуцированный магнитным полем со стороны фазы В. Аналогичные обозначения и для токов фазы В. Углы взяты из соображения, что индуцированный собственным полем ток сдвинут относительно основного тока на  $90^\circ$ , значит ток индуцированный магнитным полем соседней фазы сдвинут на значение угла между фазами плюс  $90^\circ$ . Из векторной диаграммы на рис. 13 также видно, что в каждой фазе токи индуцируются одинаково. Иная ситуация с током со сдвигом по фазе  $120^\circ$  (рис. 14).

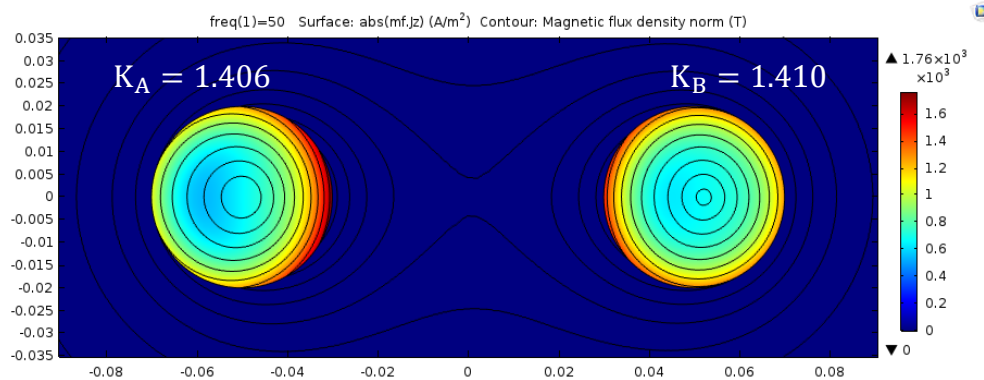


Рис. 14. Распределение модуля плотности тока (цвет), контурные линии модуля магнитной индукции (черные контурные линии) и коэффициенты увеличения сопротивлений

На рис. 14 наблюдается асимметрия в распределениях, что объясняется несимметричностью системы, которая заключается в том, что правый проводник опережает по фазе левый на  $120^\circ$ , а левый опережает правый на  $240^\circ$ . Для более наглядного объяснения можно воспользоваться векторной диаграммой токов (рис. 15).

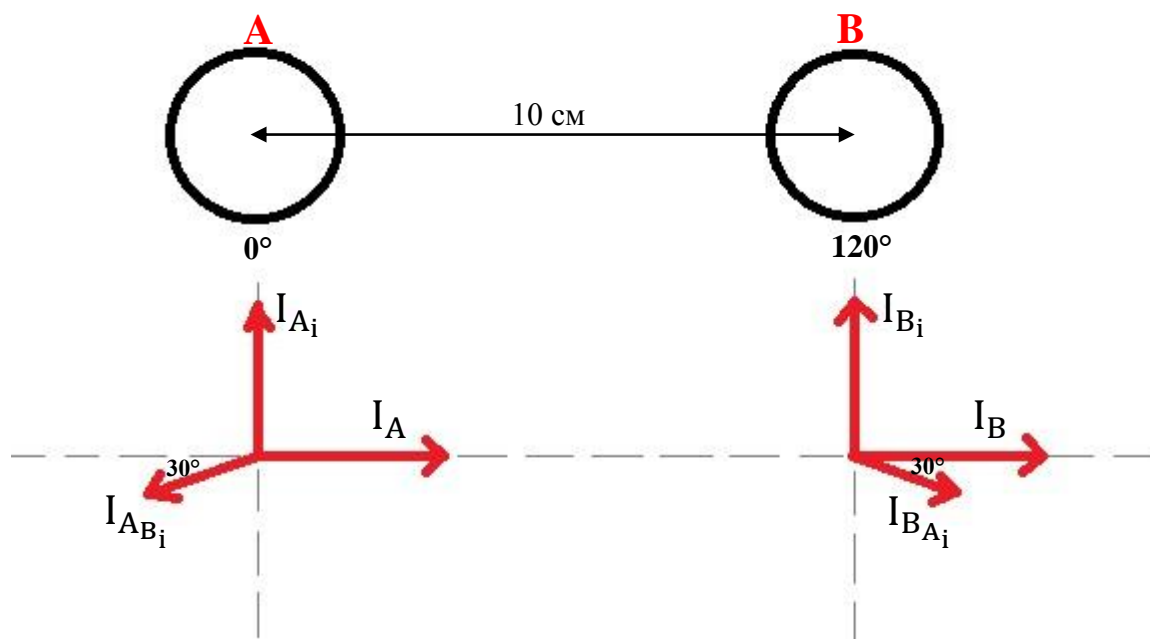


Рис. 15. Векторная диаграмма токов сдвинутых на  $120^\circ$

Ток в фазе А, индуцированный от соседнего проводника, ослабляет основной, а в фазе В наоборот усиливает, поэтому абсолютное значение результирующего вектора тока в фазе В будет больше чем в фазе А. Это также видно, если вдоль горизонтальной линии, проходящей через центры проводников, построить действующее значение индуцированного тока (рис. 16).

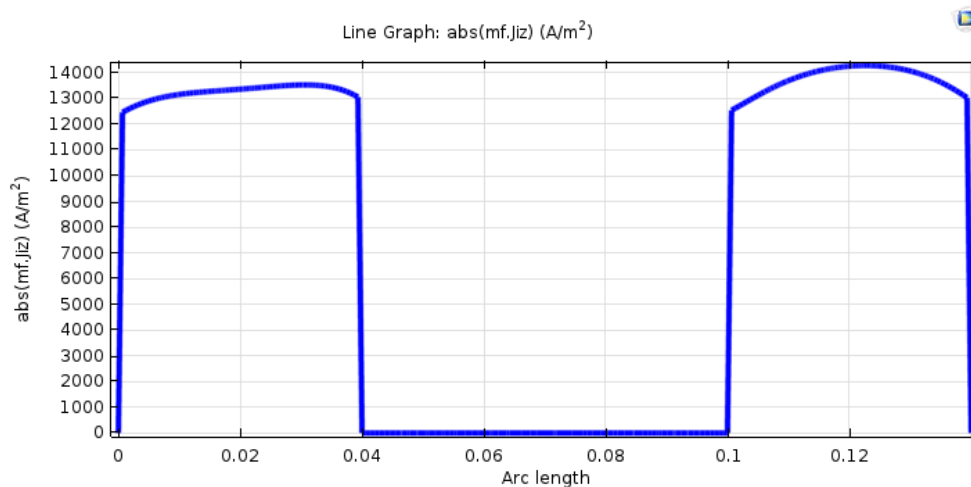


Рис. 16. Индуцированный ток в фазе А и фазе В в зависимости от координаты вдоль линии

## 5.2. Три фазы

Для трехфазной системы проводников результат представлен на рис. 17 и рис. 18.

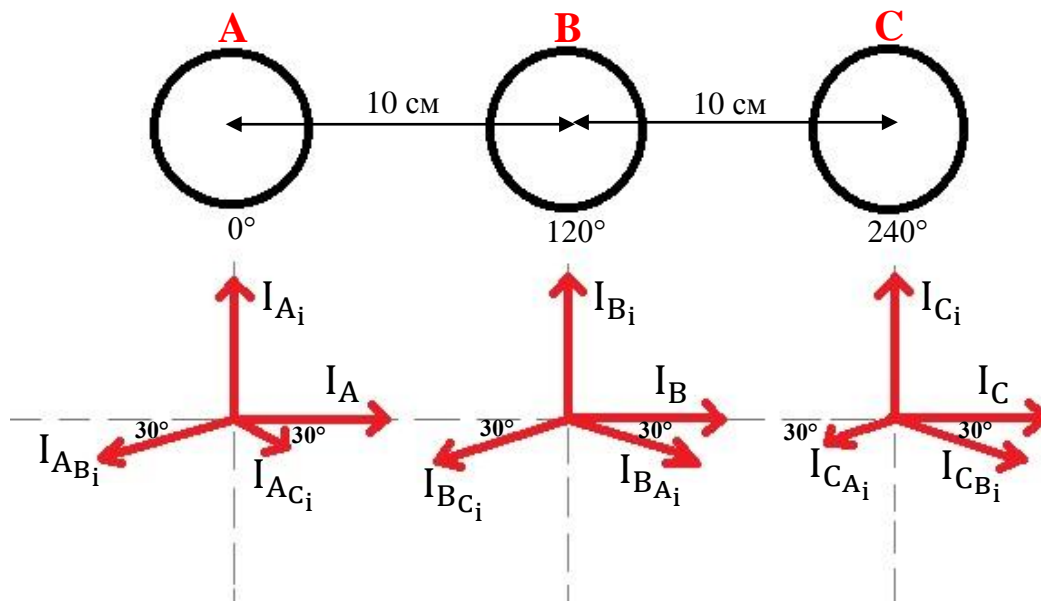


Рис. 17. Векторная диаграмма токов сдвинутых на  $120^\circ$  относительно друг друга в трехфазной системе

Результирующий вектор фазы С больше чем фазы А: по оси абсцисс ток фазы С усиливается индуцированными токами, а у фазы А ослабляется, по оси ординат значения результирующих токов будут одинаковы. Таким образом, векторная сумма токов фазы С будет больше чем у фазы А. Вследствие этого и распределения токов и нагрева (если его рассчитывать) будут несимметричны.

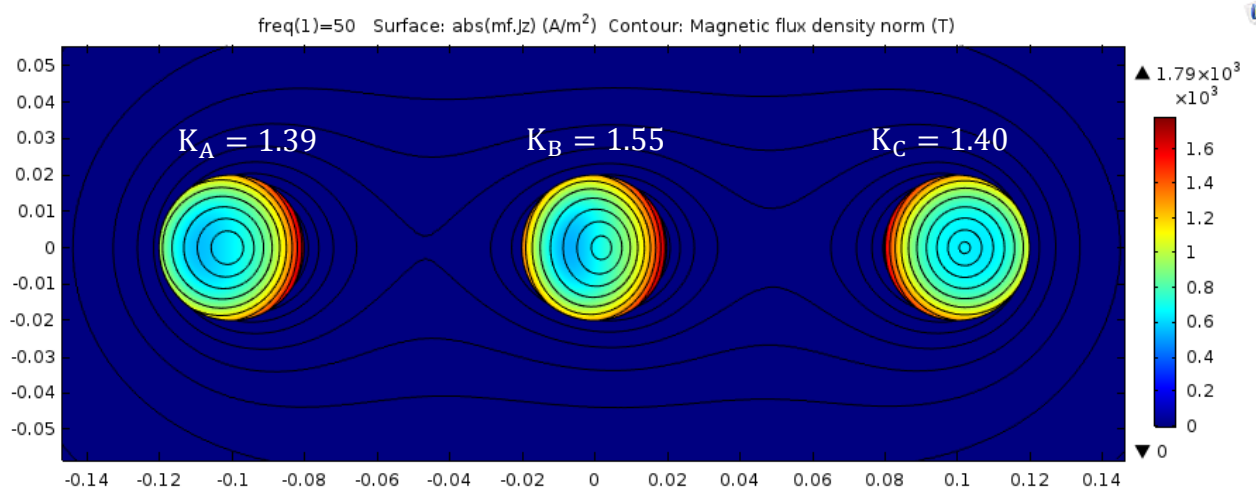


Рис. 18. Распределение модуля плотности тока (цвет), контурные линии модуля магнитной индукции (черные контурные линии) и коэффициенты увеличения сопротивлений

На распределении модуля плотности тока видна асимметрия в центральном проводнике, для крайних это заметно по контурным линиям модуля магнитной индукции.

Для наглядности строится распределение модуля плотности индуцированного тока вдоль горизонтальной линии, проходящей через центры проводников.

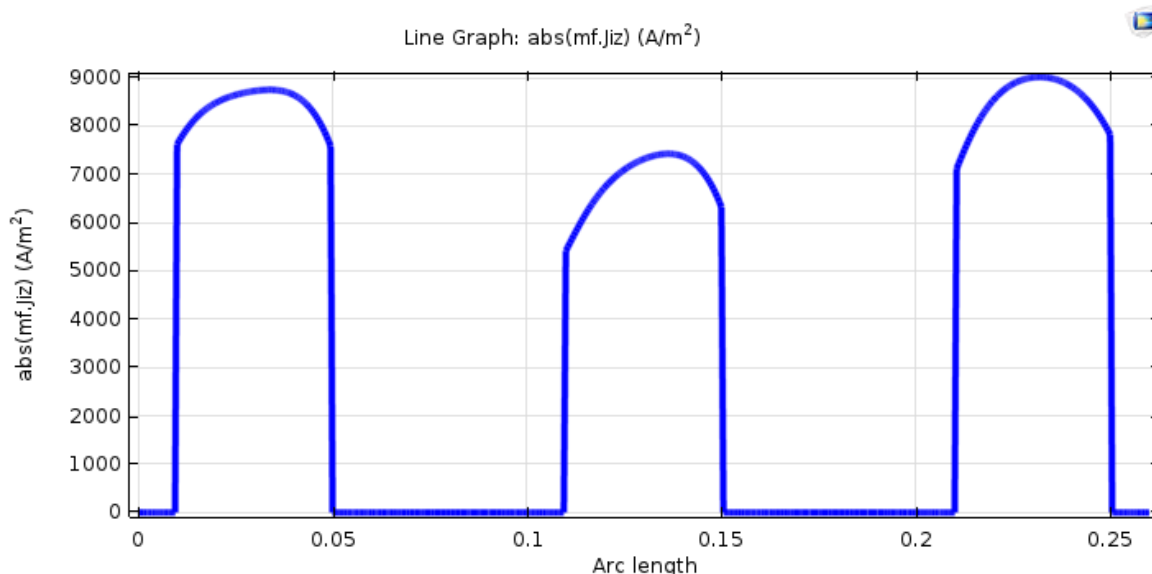


Рис. 19. Модуль плотности индуцированного тока в фазе А, В и С в зависимости от координаты вдоль линии

На рис. 19 различие в модуле плотности тока в соседних шинах достигает  $\approx 20\%$ .

### 5.3. Выводы

Было исследовано явление асимметричного распределения полей и плотностей токов на примере двух задач.

- Причина асимметрии объясняется с помощью векторных диаграмм для полных токов, которые показывают каким образом индуцированные от собственных и соседних магнитных полей токи влияют на результирующий ток, ослабляя или наоборот усиливая его.
- Расчет коэффициентов увеличения эффективного сопротивления показывает, насколько сильно проявляется асимметрия в распределениях: для геометрии с двумя проводниками величины в соседних проводниках отличаются на  $0.3\%$ , а в трехфазной системе различия достигают  $11.5\%$ .

## 6. Исследование влияния низкочастотного переменного тока на распределения токов в проводниках простой геометрической формы с учетом их взаимного влияния

### 6.1. Исследование взаимного влияния прямоугольных шин

#### 6.1.1. Шины расположенные горизонтально

В основном в высоковольтных аппаратах используются не провода, а шины прямоугольного или круглого сечения, по которым протекает большой ток (порядка кА). Существуют различные конфигурации проводников, количество шин на каждой из фаз тоже зависит от конкретного случая (количество шин в пакете). В данном параграфе будут рассматриваться три прямоугольные медные шины сечением 100x10 мм, расстояние между которыми будет варьироваться от 110 мм до 250 мм. На внешнюю границу воздуха задается условие касательности магнитного поля, на шину – полный ток 3500 А. В прямоугольниках строится упорядоченная сетка, а в остальной области неупорядоченная (рис. 20).

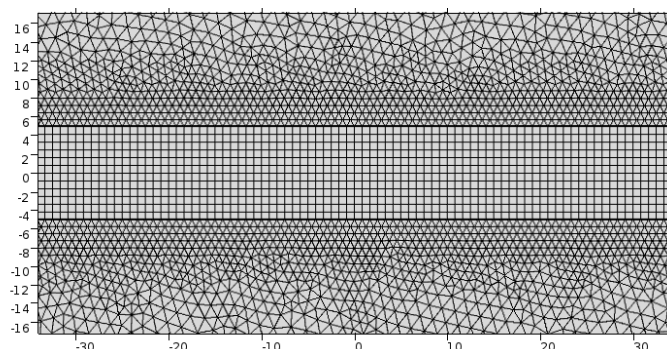


Рис. 20. Конечно-элементная сетка в прямоугольной шине

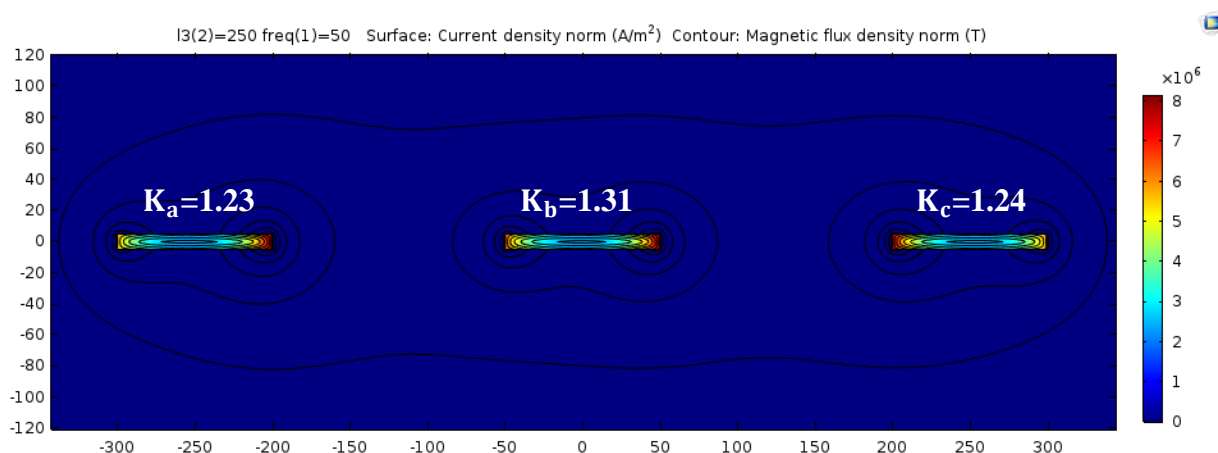


Рис. 21. Распределение модуля плотности тока (цвет) и контурные линии модуля магнитной индукции (черные контурные линии)



На рис. 21 представлен модуль плотности тока и контурные линии модуля магнитной индукции, как и в задачах главы 5 наблюдается асимметрия в распределении. Далее проводилось варьирование межцентрового расстояния между шинами (рис. 22).

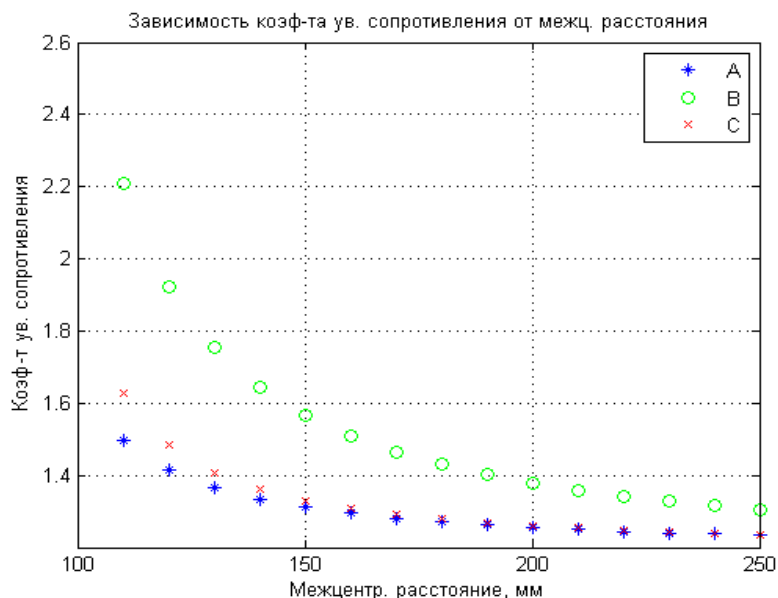


Рис. 22. Графики зависимостей коэффициента увеличения сопротивления от межцентрового расстояния

При увеличении межцентрового расстояния между шинами коэффициенты увеличения сопротивления уменьшались, т.к. по мере увеличения расстояния уменьшалось их взаимодействие. Для количественной характеристики поля была построена зависимость модуля магнитной индукции вдоль горизонтальной линии, проходящей через центры шин при межцентровом расстоянии 110 мм (рис. 23) и 250 мм (рис.24).

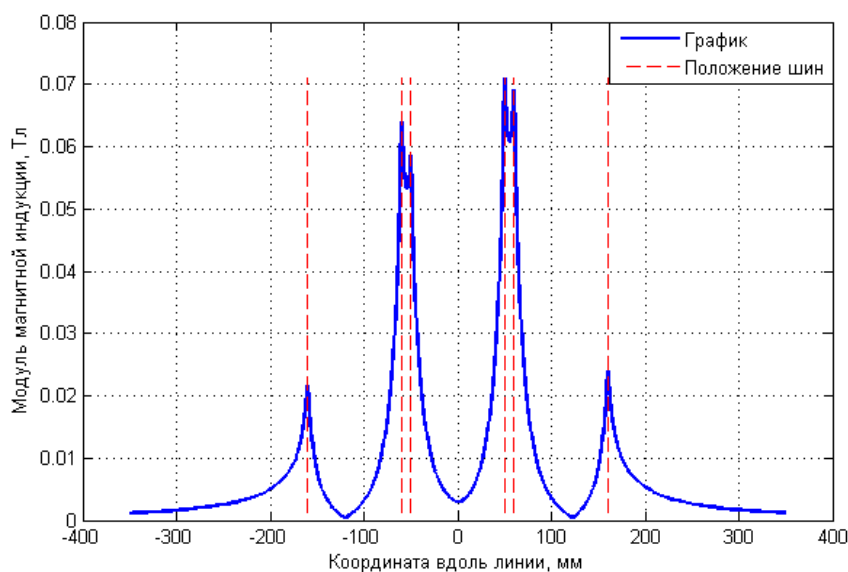


Рис. 23. График зависимости модуля магнитной индукции от координаты вдоль линии при расстоянии 110 мм между шинами

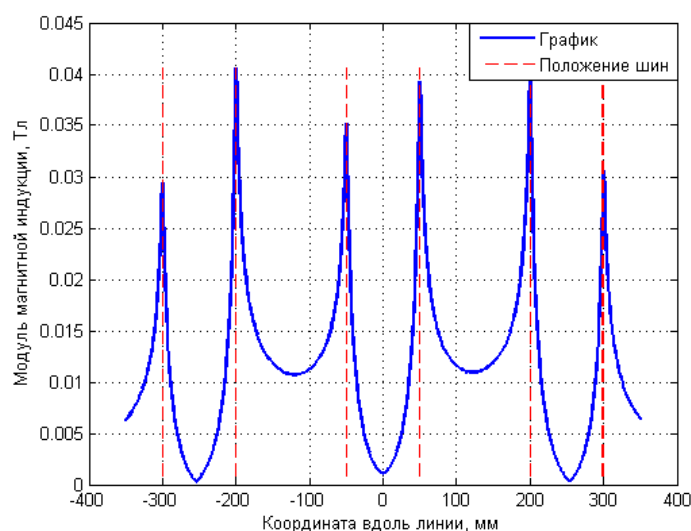


Рис. 24. График зависимости модуля магнитной индукции от координаты вдоль линии при расстоянии 250 мм между шинами

В случае, когда межцентровое расстояние между шинами составляет 250 мм, модуль магнитной индукции имеет минимумы, которых при 110 мм нет из-за малого межцентрового расстояния. Т.к. магнитное поле индуцирует токи, которые искажают распределение плотности тока, снижение магнитного поля приведет к уменьшению эффекта близости между соседними шинами, что и наблюдается на рис. 22.

### 6.1.2. Шины расположенные вертикально

Далее рассматриваются шины, повернутые на  $90^\circ$ . В ходе решения аналогичным образом строятся графики, распределения и считаются коэффициенты увеличения сопротивлений (рис. 25, 26, 27 (а, б)).

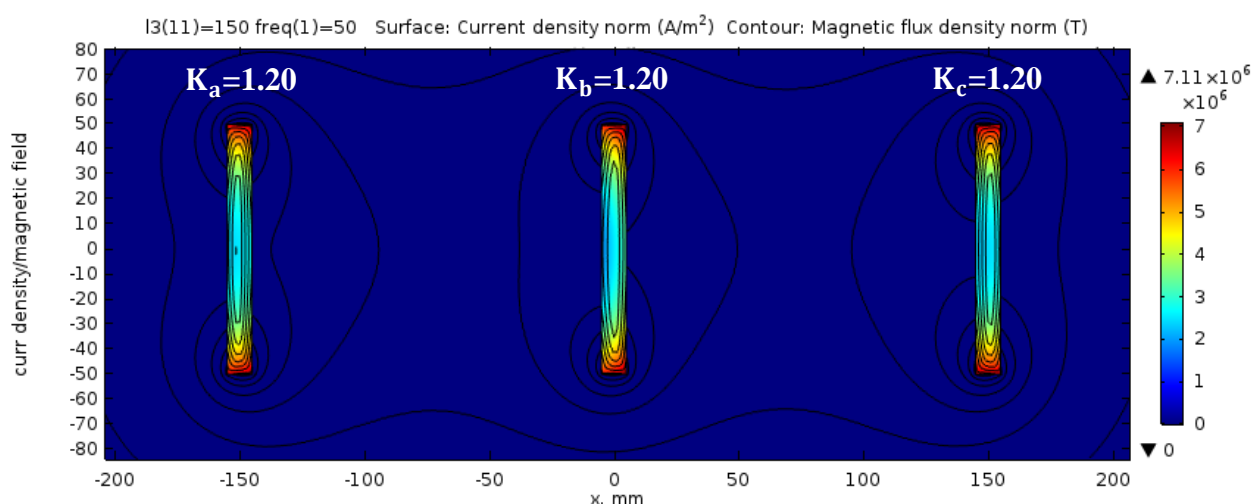


Рис. 25. Распределение модуля плотности тока (цвет) и контурные линии модуля магнитной индукции (черные контурные линии)

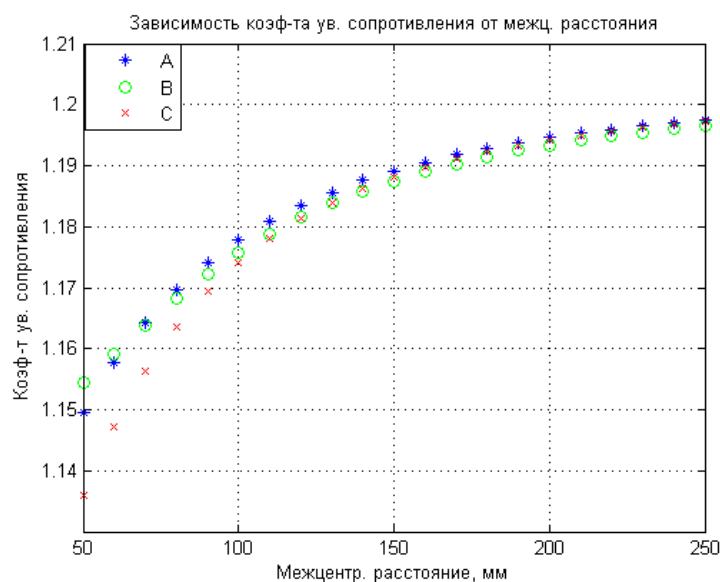


Рис. 26. Графики зависимостей коэффициента увеличения сопротивления от межцентрового расстояния

Асимптотика на рис. 26 соответствует уединенной шине, на скин-эффект которой влияет только ее собственное магнитное поле.

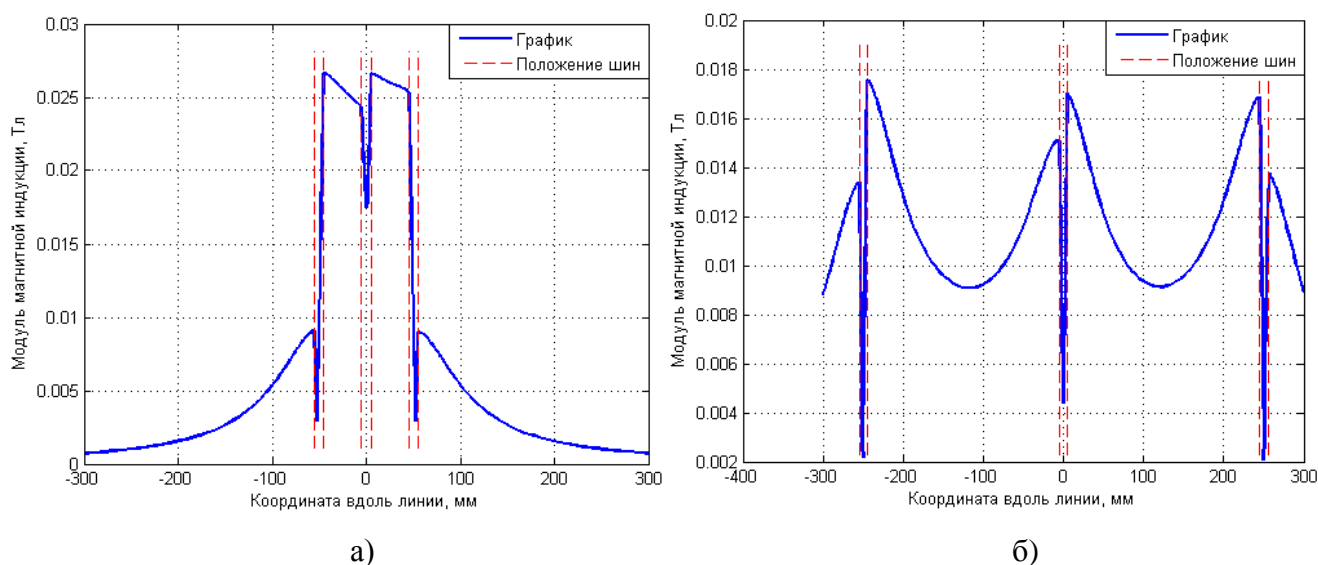


Рис. 27. График зависимости модуля магнитной индукции от координаты вдоль линии при расстоянии между шинами а) 50 мм, б) 250 мм

При данной конфигурации шин интересно то, что при сближении коэффициент увеличения сопротивления уменьшается. Из рис. 27 видно, что при близком расположении шин модуль магнитной индукции между ними заметно больше. Это говорит о том, что при расположении шин вертикально поля от шин направлены таким образом, что не усиливают эффект близости, как в случае шин расположенных горизонтально, а наоборот ослабляют его. На примере этих двух задач видно, что конфигурация проводников влияет на распределения токов и возникающий скин-эффект, и эффект близости. Подобный анализ позволяет найти оптимальное расположение

токоведущих элементов, минимизировать их эффективное сопротивление и, как следствие, уменьшить нагрев.

### 6.1.3. Пакеты из двух шин расположенных горизонтально и вертикально

На каждой фазе рассматривается по две шины на расстоянии 25 мм, 10 мм и 1 мм друг от друга. На рис. 28 и 29 в качестве иллюстрации представлены некоторые результаты решения.

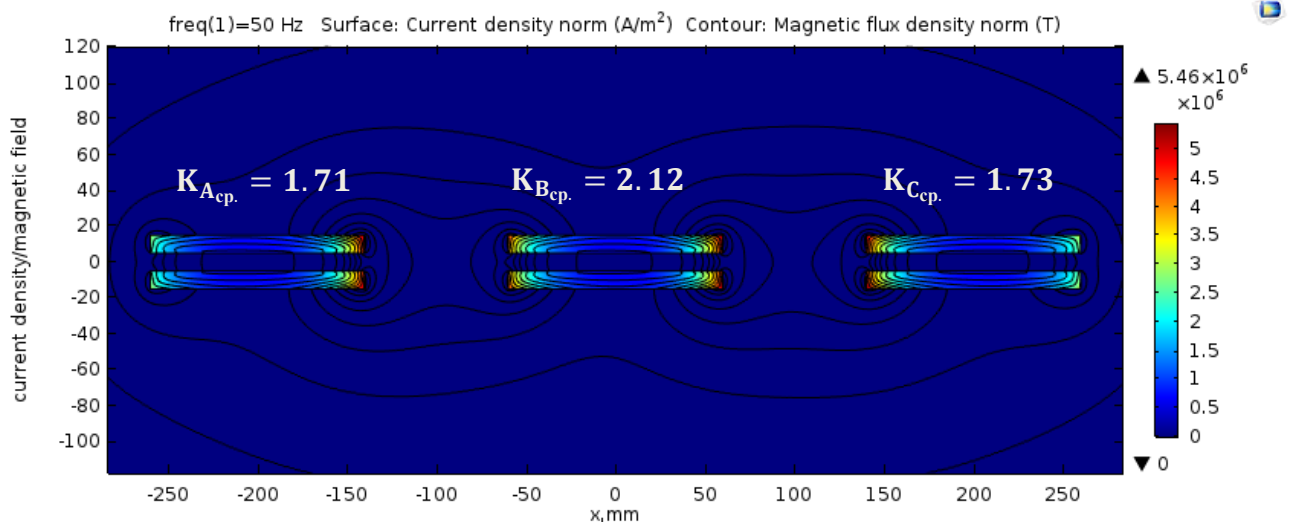


Рис. 28. Распределение модуля плотности тока (цвет) и контурные линии модуля магнитной индукции (черные контурные линии), расстояния между шинами в пакете 10 мм, межцентровое расстояние 200 мм

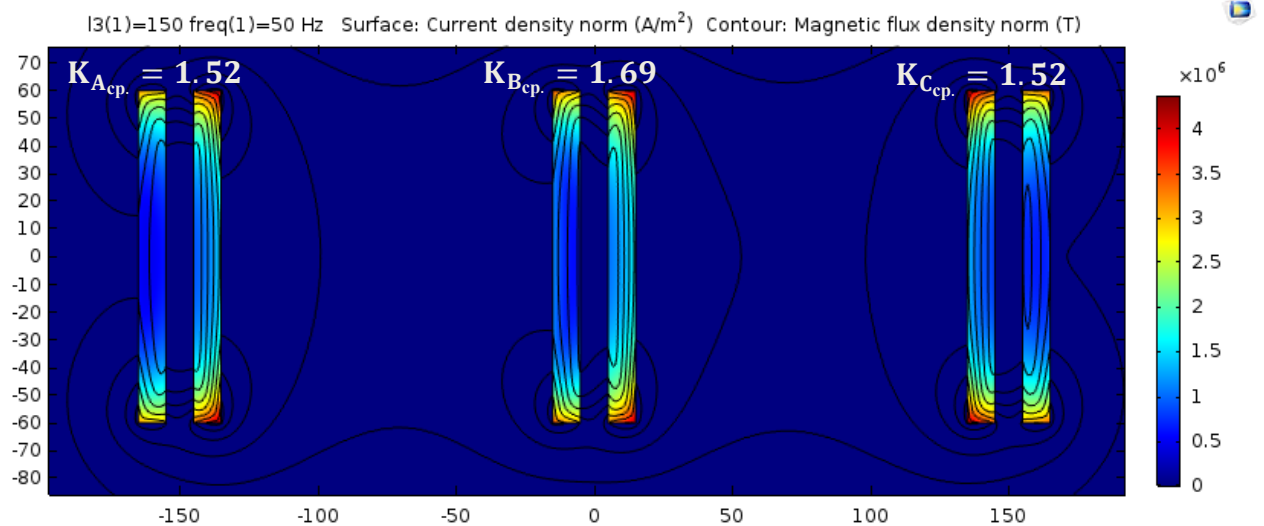


Рис. 29. Распределение модуля плотности тока (цвет) и контурные линии модуля магнитной индукции (черные контурные линии), расстояния между шинами в пакете 10 мм, межцентровое расстояние 150 мм

Для данных задач также как и в параграфе 6.1.2. варьировалось межцентровое расстояние (рис. 30, 31).

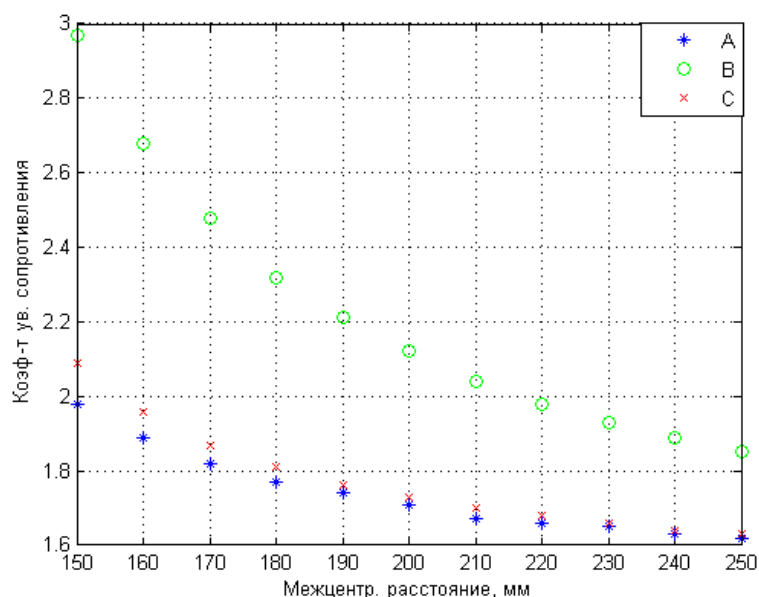


Рис. 30. Графики зависимостей коэффициента увеличения сопротивления от межцентрового расстояния для шин расположенных горизонтально

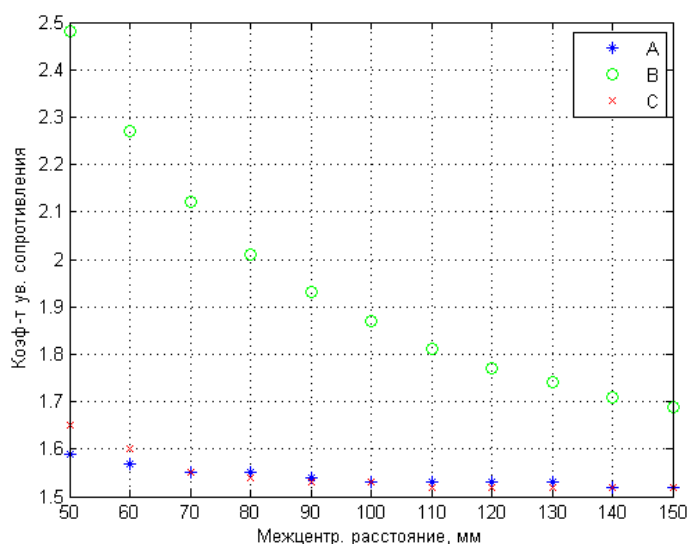


Рис. 31. Графики зависимостей коэффициента увеличения сопротивления от межцентрового расстояния для шин расположенных вертикально

Взаимодействие между вертикально расположенными шинами меньше, вследствие чего эффект близости слабее.

#### 6.1.4. Изменения сдвига по фазе и амплитуды тока

Принято, что сдвиг по фазе в трехфазной сети электроснабжения составляет  $120^\circ$ , но абсолютно точно данное значение поддерживать невозможно, т.к. не существует идеально сбалансированной нагрузки на сеть. Аналогичная ситуация и с амплитудой тока, протекающего по фазе, вследствие несбалансированной нагрузки на сеть, она может измениться. В исследовании

изложенном выше при моделировании начальный фазовый угол и амплитуда токов остаются неизменными, поэтому, для того чтобы полученные результаты были практически применимы, нужно убедиться в том, что небольшие изменения по фазе и амплитуде не приводят к большим изменениям расчетных величин.

Для шины 10x100 мм, расположенной вертикально с межцентровым расстоянием 150 мм с током 1 А см. табл. 2 и рис.32:

| Фаза А, ° | Фаза В, ° | Фаза С, ° | Ка   | Кб   | Кс   |
|-----------|-----------|-----------|------|------|------|
| -20       | 120       | 240       | 1.18 | 1.17 | 1.20 |
| -15       |           |           | 1.21 | 1.19 | 1.20 |
| -10       |           |           | 1.23 | 1.23 | 1.20 |
| -5        |           |           | 1.22 | 1.23 | 1.19 |
| 0         |           |           | 1.19 | 1.19 | 1.19 |
| 5         |           |           | 1.19 | 1.17 | 1.20 |
| 10        |           |           | 1.21 | 1.19 | 1.20 |
| 15        |           |           | 1.23 | 1.23 | 1.20 |
| 20        |           |           | 1.22 | 1.22 | 1.19 |

Таблица 1. Зависимость коэффициентов увеличения сопротивлений от фазового угла на фазе А

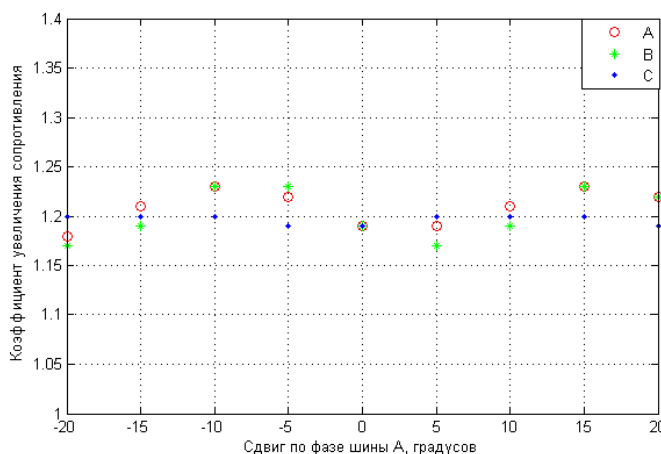


Рис. 32. Графики зависимостей коэффициента увеличения сопротивления от фазы на проводнике А

Для пакета из двух расположенных вертикально шин 10x100 мм с межцентровым расстоянием 150 мм, расстоянием между шинами 10 мм и током 1 А см. табл. 3 и рис. 33.

| Фаза А, ° | Фаза В, ° | Фаза С, ° | Ка   | Кб   | Кс   |
|-----------|-----------|-----------|------|------|------|
| -20       | 120       | 240       | 1.51 | 1.46 | 1.50 |
| -15       |           |           | 1.59 | 1.48 | 1.60 |
| -10       |           |           | 1.66 | 1.75 | 1.68 |
| -5        |           |           | 1.62 | 1.88 | 1.63 |
| 0         |           |           | 1.52 | 1.69 | 1.52 |
| 5         |           |           | 1.51 | 1.45 | 1.51 |
| 10        |           |           | 1.60 | 1.50 | 1.61 |
| 15        |           |           | 1.66 | 1.78 | 1.68 |
| 20        |           |           | 1.61 | 1.88 | 1.62 |

Таблица 2. Зависимость коэффициентов увеличения сопротивлений от фазового угла на фазе А

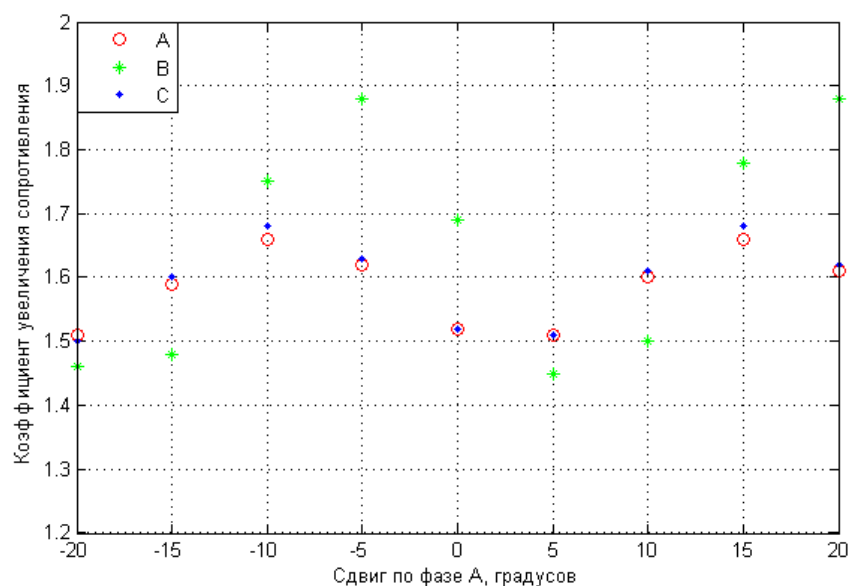


Рис. 33. Графики зависимостей коэффициента увеличения сопротивления от фазы на проводнике А

Из таблиц 1 и 2 рис. 32,33 видно, что отклонение фазового угла на  $5^\circ$  может привести к увеличению сопротивления на 10%.

Для шины 10x100 мм, расположенной вертикально с межцентровым расстоянием 150 мм с током 1 А см. табл. 3:

| Ia, А | Ib, А | Ic, А | Ka   | Kb   | Kc   |
|-------|-------|-------|------|------|------|
| 1     | 1     | 0.80  | 1.19 | 1.19 | 1.19 |
|       |       | 0.85  |      |      |      |
|       |       | 0.90  |      |      |      |
|       |       | 0.95  |      |      |      |
|       |       | 1.00  |      |      |      |
|       |       | 1.05  |      |      |      |
|       |       | 1.10  |      |      |      |
|       |       | 1.15  |      |      |      |
|       |       | 1.20  |      |      |      |

Таблица 3. Зависимость коэффициентов увеличения сопротивлений от амплитуды тока на фазе С

Для пакета из двух расположенных вертикально шин 10x100 мм с межцентровым расстоянием 150 мм, расстоянием между шинами 10 мм и током 1 А см. табл. 3 и рис. 33.

| Ia, А | Ib, А | Ic, А | Ka   | Kb   | Kc   |
|-------|-------|-------|------|------|------|
| 1     | 1     | 0.80  | 1.52 | 1.65 | 1.55 |
|       |       | 0.85  | 1.53 | 1.66 | 1.54 |
|       |       | 0.90  |      | 1.67 | 1.53 |
|       |       | 0.95  |      | 1.68 | 1.53 |
|       |       | 1.00  |      | 1.69 | 1.52 |
|       |       | 1.05  |      | 1.70 | 1.52 |
|       |       | 1.10  |      | 1.71 | 1.51 |
|       |       | 1.15  |      | 1.73 | 1.51 |
|       |       | 1.20  |      | 1.74 | 1.51 |

Таблица 4. Зависимость коэффициентов увеличения сопротивлений от амплитуды тока на фазе С

При отклонении амплитуды тока в фазе С на 5-10%, изменение коэффициентов увеличения сопротивления незначительно,  $\approx 1\%$ , поэтому данными эффектами можно пренебречь.

## 6.2. Исследование взаимного влияния цилиндрических проводников

В КРУ обычно используется подвижная конструкция (выкатной элемент), к которой присоединен КМ аппарата. Если нужно заменить какую-то деталь или провести диагностику КМ, он выдвигается из КРУ и вынимается из отсека коммутационных модулей. Подсоединение к системе ошиновки и отсоединение от нее производится цилиндрическими проводниками со специальными контактами (рис. 34). В текущем параграфе эти проводники рассматриваются аналогично задачам с прямоугольными шинами. Наибольший интерес представляют коэффициенты увеличения сопротивлений и их зависимость от расстояния между проводниками.

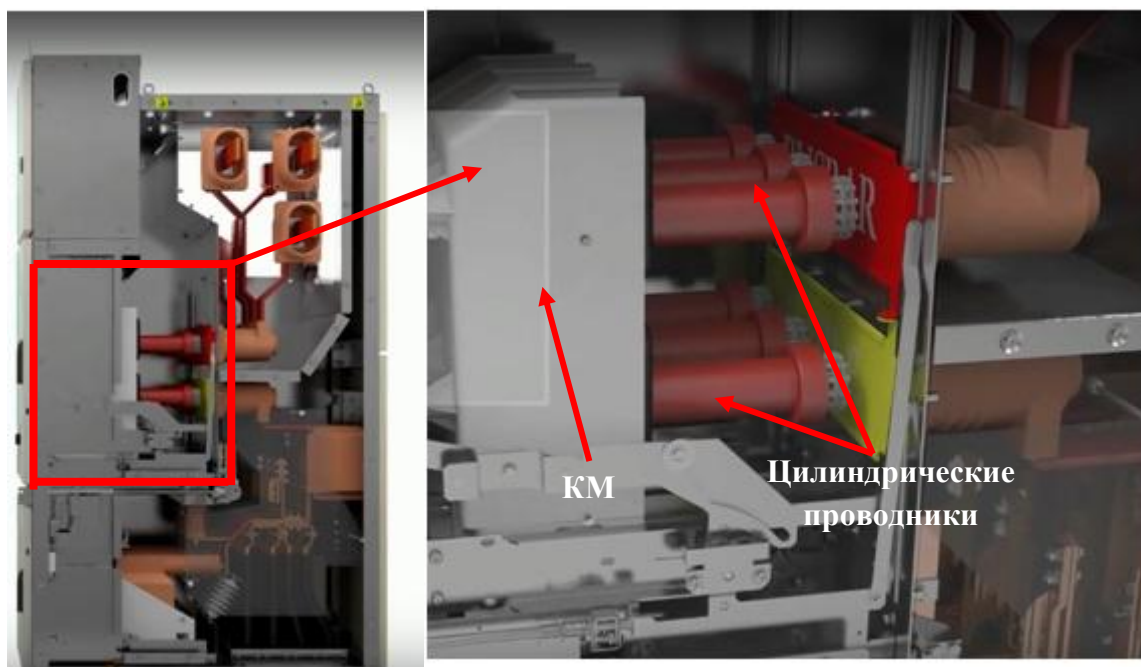


Рис. 34. 3D модель КРУ, разработанная ПГ ТЭ

На верхние три проводника подается ток 1600 А, сдвинутый по фазе на  $120^\circ$ , аналогично на нижние, но в другую сторону. На рис. 35 представлены распределения и коэффициенты в случае, когда по горизонтали межцентровое расстояние 275 мм, а по вертикали 150 мм. Внутренний радиус проводника 25 мм, а внешний 40 мм.



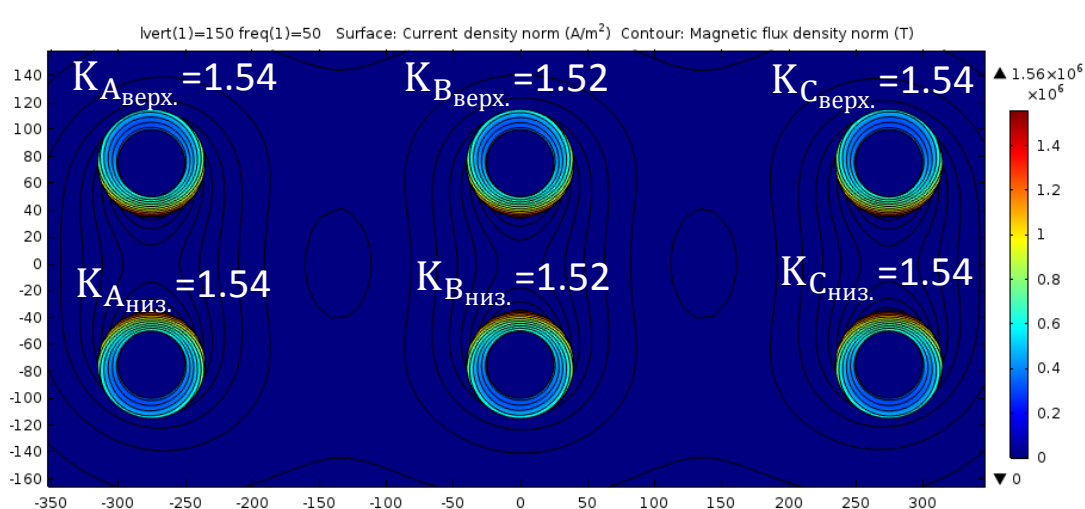


Рис. 35. Распределение модуля плотности тока (цвет) и контурные линии модуля магнитной индукции (черные контурные линии)

Зависимости коэффициентов увеличения сопротивлений от межцентровых расстояний представлены в таблице 6 и таблице 7.

| Межцентровое расстояние по горизонтали | $K_{верх.A}$ | $K_{верх.B}$ | $K_{верх.C}$ | $K_{низ.A}$ | $K_{низ.B}$ | $K_{низ.C}$ |
|--|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 150                                    | 1.52         | 1.56         | 1.52         | 1.52        | 1.56        | 1.52        |
| 210                                    | 1.53         | 1.50         | 1.52         | 1.53        | 1.50        | 1.52        |
| 250                                    | 1.54         | 1.51         | 1.53         | 1.54        | 1.51        | 1.53        |
| 275                                    | 1.54         | 1.52         | 1.54         | 1.54        | 1.52        | 1.54        |

Таблица 5. Зависимость коэффициентов увеличения сопротивлений от межцентрового расстояния по горизонтали при расстоянии по вертикали 150 мм

| Межцентровое расстояние по вертикали | $K_{верх.A}$ | $K_{верх.B}$ | $K_{верх.C}$ | $K_{низ.A}$ | $K_{низ.B}$ | $K_{низ.C}$ |
|--------------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 150                                  | 1.52         | 1.56         | 1.52         | 1.52        | 1.56        | 1.52        |
| 200                                  | 1.48         | 1.62         | 1.49         | 1.48        | 1.62        | 1.49        |
| 250                                  | 1.48         | 1.69         | 1.49         | 1.48        | 1.69        | 1.49        |
| 300                                  | 1.49         | 1.74         | 1.50         | 1.49        | 1.73        | 1.50        |

Таблица 6. Зависимость коэффициентов увеличения сопротивлений от межцентрового расстояния по вертикали при расстоянии по горизонтали 150 мм

С одной стороны, изменение расстояния по горизонтали не приводит к существенному изменению полученных данных. Если же изменять межцентровое расстояние по вертикали, то по мере его уменьшения эффект близости ослабевает. Это говорит о том, что при конструировании подобных проводников их лучше располагать ближе по вертикали. С другой стороны, существует условие на электропрочность конструкции, т.к. при сильном сближении возможен электрический пробой промежутка.

### 6.3. Исследование влияния металлической оболочки на распределение тока в проводниках

В большинстве случаев системы шин или КМ окружены металлическими оболочками, например стенки корпуса в КРУ, в составе которого и находятся шины с КМ. В данном параграфе рассматривается упрощенная модель оболочки вокруг шин, чтобы понять насколько она может влиять на распределения тока и скин-эффект. Обычно подобные оболочки сделаны из конструкционной стали (марка сталь 10). Геометрия задачи представлена на рис. 36, строилось три медные шины 120x10 мм с межцентровым расстоянием 275 мм и стальная оболочка 1000x300 мм толщиной 2 мм.

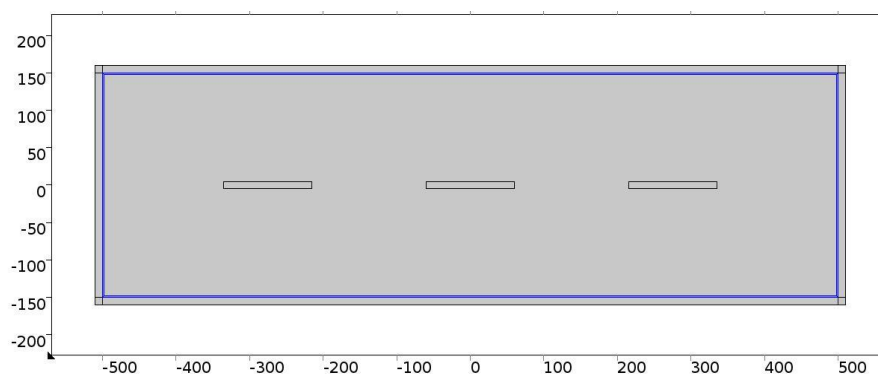


Рис. 36. Геометрия задачи с оболочкой

Синим цветом на рис. 36 выделена стальная оболочка.

Свойства материалов:

- Сталь:  $\mu = 500, \sigma = 7 \cdot 10^6 \left(\frac{\text{См}}{\text{м}}\right)$ .
- Медь:  $\mu = 1, \rho = 1.68 \cdot 10^{-8} (\text{Ом} \cdot \text{м})$ .

Результаты решения показаны на рис. 37 (распределение модуля плотности тока), рис. 38 (распределение модуля магнитной индукции) и на рис. 39 (график зависимости коэффициентов увеличения сопротивлений от увеличения размеров оболочки).

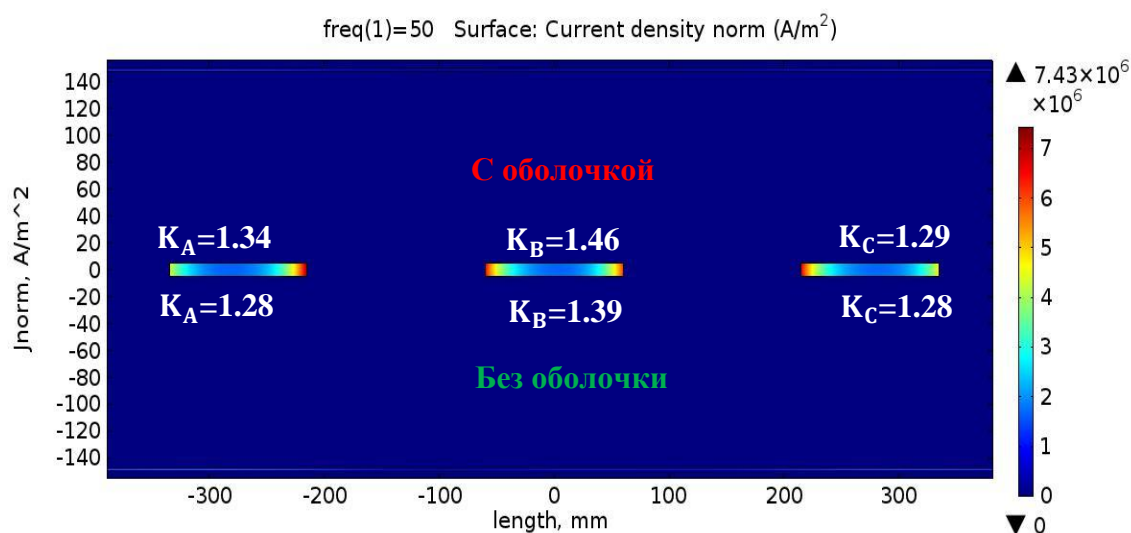


Рис. 37. Распределение модуля плотности тока и коэффициенты увеличения сопротивлений с оболочкой и значения коэффициентов увеличения сопротивления с ней (наверху) и без нее (внизу)

Оболочка оказывает заметное влияние на распределение токов в шинах.

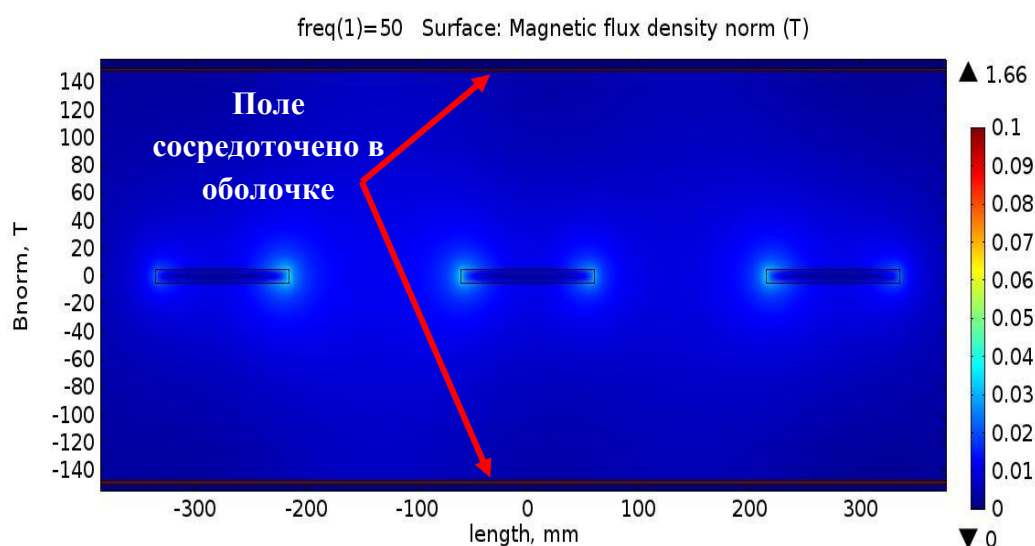


Рис. 38. Распределение модуля магнитной индукции

По распределению модуля магнитной индукции видно, что в силу большой магнитной проницаемости стали, поле в основном циркулирует внутри стальной оболочки. Изменяясь, магнитное поле индуцирует токи в оболочке, которые, в свою очередь, создают поле влияющее на распределения тока в шинах.

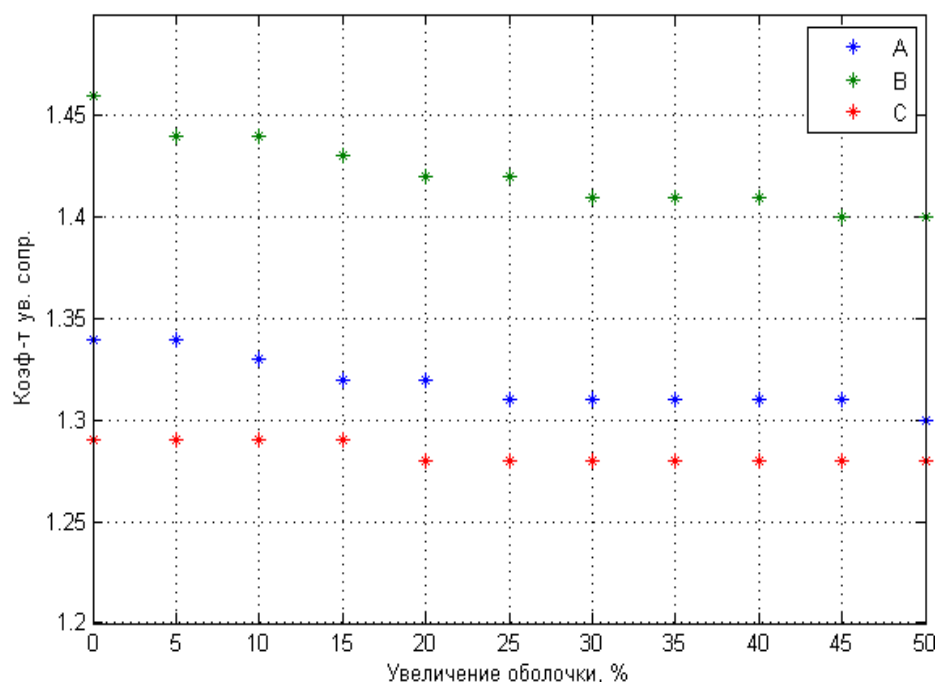


Рис. 39. Графики зависимостей коэффициента увеличения сопротивления от размера оболочки

Чем ближе оболочка располагается к шинам, тем большее влияние она оказывает на распределение тока и усиливает эффект близости.

#### 6.4. Выводы

Выводы по результатам текущей главы:

- Конфигурация шин расположенных вертикально оптимальна как для одиночных шин, так и для пары шин в пакете.
- В случае цилиндрических проводников, используемых для соединения КМ с главной цепью, для минимизации скин-эффекта лучше располагать их на меньшем расстоянии по вертикали, но не ближе допустимого критериями электропрочности.
- Индуцированные в металлической оболочке токи, влияют на распределения тока в шинах, увеличивая их эффективное сопротивление. Влияние уменьшается при увеличении размера оболочки.

## 7. Исследование влияния низкочастотного переменного тока на распределения токов в современных высоковольтных электрических аппаратах

На высоковольтных линиях для предотвращения возможных последствий аварии устанавливают коммутационную аппаратуру, главной составной частью которой является КМ. Каждый разработанный аппарат проходит испытания, в том числе на нагрев. Максимально допустимый перегрев строго регламентирован документом ГОСТ 8024-90. Возникающие скин-эффекты и эффекты близости, увеличивая эффективное сопротивление, увеличивают и перегрев конструкции. Поэтому эти эффекты должны быть учтены при проектировании высоковольтных электрических аппаратов. В текущей главе исследуется скин-эффект в современных КМ разрабатываемых ПГ ТЭ. В первом параграфе исследуется аппарат рассчитанный на напряжение 15 кВ и ток 1250 А (№1), а во втором – на 15 кВ и ток 3150 А (№2).

### 7.1. Коммутационный модуль №1

#### 7.1.1. Геометрия

Для решения задачи в программе для проектирования и создания трехмерных моделей была построена упрощенная модель №1 и импортирована в ANSYS Workbench для создания конечно-элементной модели. При создании геометрии из рассмотрения исключались изоляционные материалы и упрощались металлические элементы КМ (см. рис. 40).

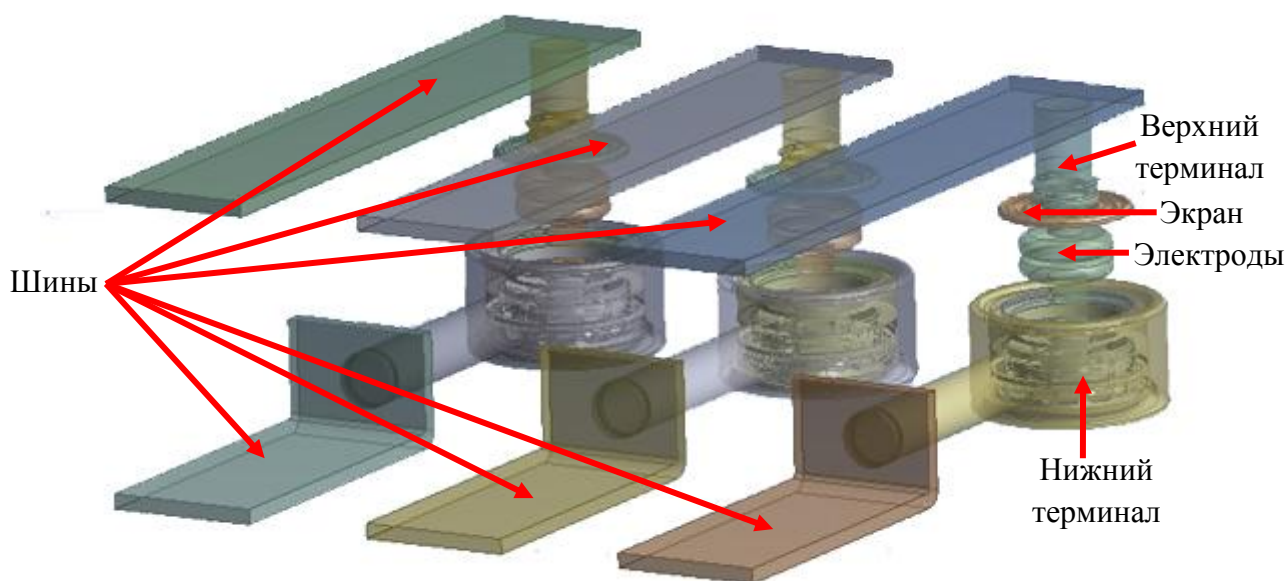


Рис. 40. Геометрия №1



На рис. 41 подробнее рассмотрен нижний терминал, в состав которого входит гибкий токосъем.

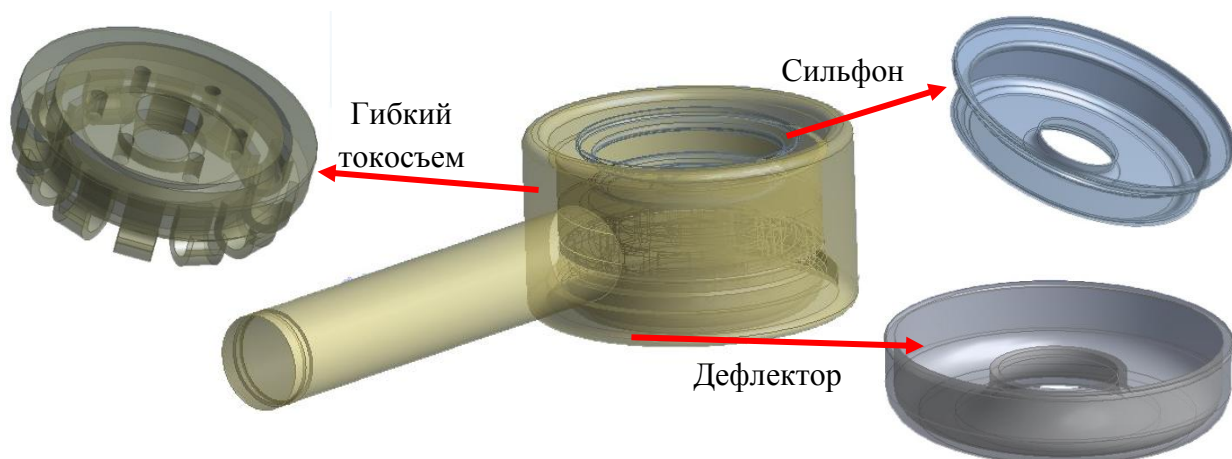


Рис. 41. Нижний терминал №1

### 7.1.2. Сетка

Строилась неупорядоченная тетрагональная сетка (рис. 42).

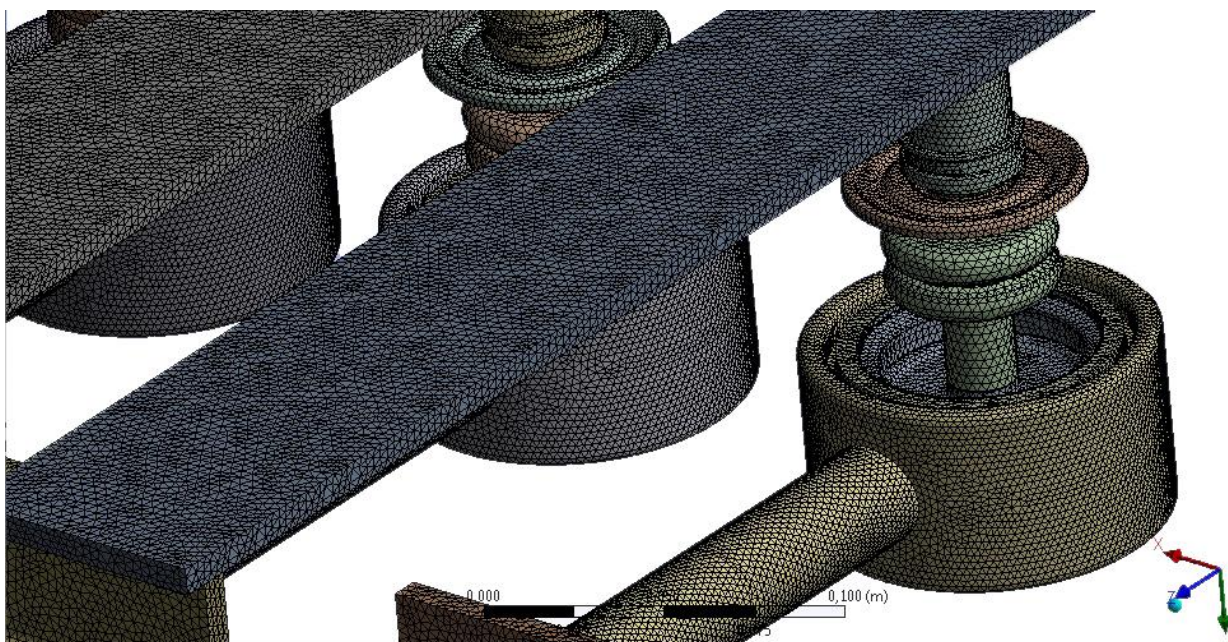


Рис. 42. Сетка в модели №1

Выбранный размер элемента является оптимальным, т.к. при небольшом уменьшении размера элементов решение не изменяется.

### 7.1.3. Граничные условия

На границы объема воздуха необходимо задавать условие параллельности магнитного поля. На верхние шины задается ток 1250 А и узлы связываются по потенциалу, а на нижние шины задается потенциал равный нулю (рис. 43).

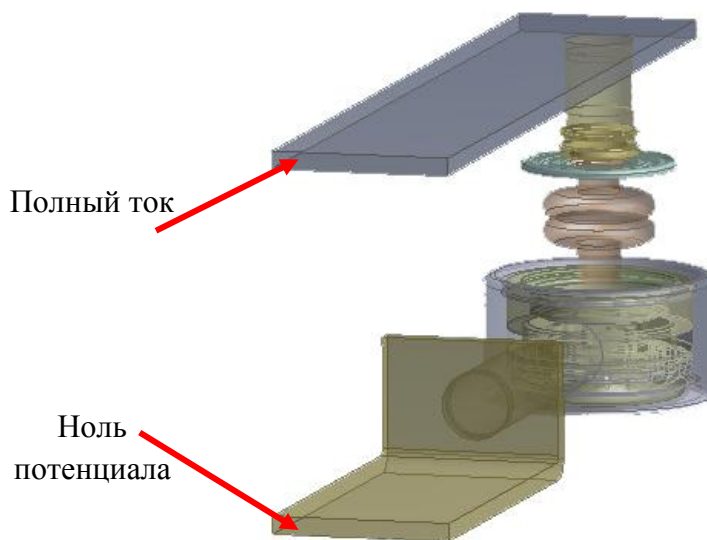


Рис. 43. Граничные условия в модели №1

### 7.1.4. Решение и результаты

Рассчитывалась гармоническая задача с ПЧ изменения тока.

На рис. 44 представлено распределение модуля плотности тока для КМ целиком, а на рис. 45 для его отдельных элементов.

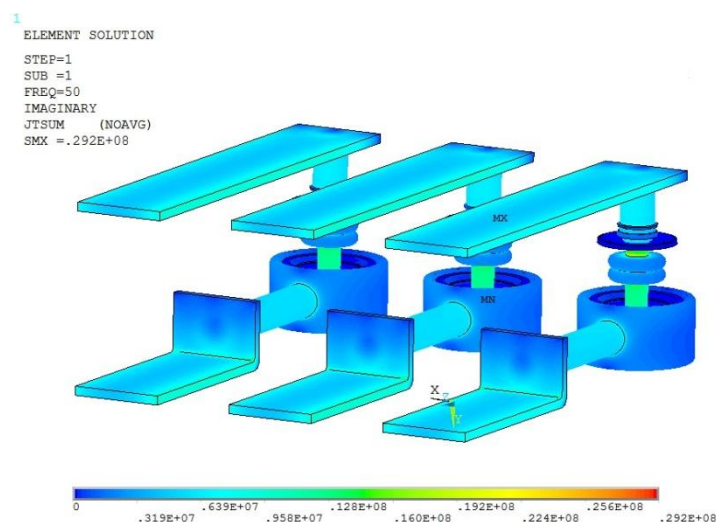


Рис. 44. Распределение модуля плотности тока в модели №1

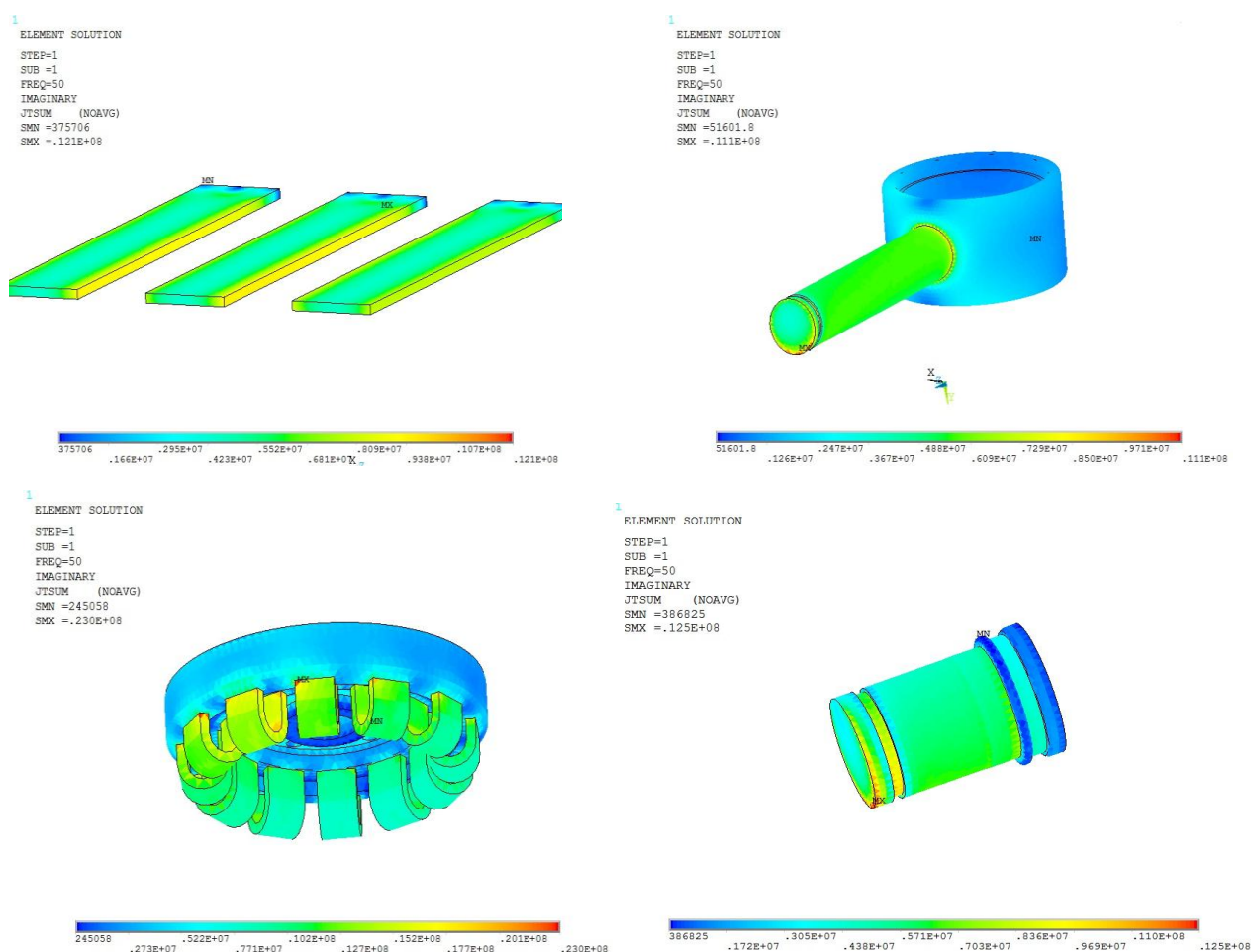


Рис. 45. Распределение модуля плотности тока для элементов КМ №1

Как и в предыдущих 2D задачах характеристикой скин-эффекта выступают коэффициенты увеличения сопротивлений, приведенные в таблице 7.

|                      |   | Коэффициент увеличения сопротивления |
|----------------------|---|--------------------------------------|
| Верхний терминал     | A | 1.06                                 |
|                      | B |                                      |
|                      | C |                                      |
| Гибкий токосъем (ГТ) | A | 1.00                                 |
|                      | B |                                      |
|                      | C |                                      |
| Нижний терминал      | A | 1.05                                 |
|                      | B | 1.06                                 |
|                      | C | 1.05                                 |

Таблица 7. Коэффициенты увеличения сопротивлений отдельных элементов КМ №1

Скин-эффект в данном КМ незначителен. В ГТ сопротивление вообще не изменяется, что объясняется наличием у него ламелей (12 штук) – гибких и тонких проводников расположенных по окружности. На практике каждая из них состоит из тонких медных листов соединенных вместе. Также в данной таблице не приведены другие элементы: электроды, дефлектор, сильфон и экран.



Дефлектор и экран выполняют функцию экранирования электрического поля, и ток по ним не протекает (как и по сильфону), поэтому их отдельное рассмотрение не представляет интереса. В реальности электроды находятся в вакуумной камере и имеют более сложную геометрию, чем в представленной модели. Подробное рассмотрение вакуумной камеры КМ является отдельной задачей и не рассматривается в рамках данной работы, т.к. ток протекающий через электроды, изготовленные по специальной технологии, закручивается и создает аксиальное магнитное поле, что не может быть учтено в упрощенной постановке. Кроме этого, вакуумная камера вместе с электродами не будут существенно влиять на распределения тока, т.к. размер электродов мал, и возникающий в них скин-эффект будет незначительным.

## 7.2. Коммутационный модуль №2

### 7.2.1. Геометрия

На рис. 46 представлена геометрия одной из фаз №2 (другие две фазы ей идентичны), а на рис. 47 сетка. Геометрия, как и в предыдущем КМ выполнена в программе автоматизированного проектирования, а дальнейшее моделирование в ANSYS Workbench.

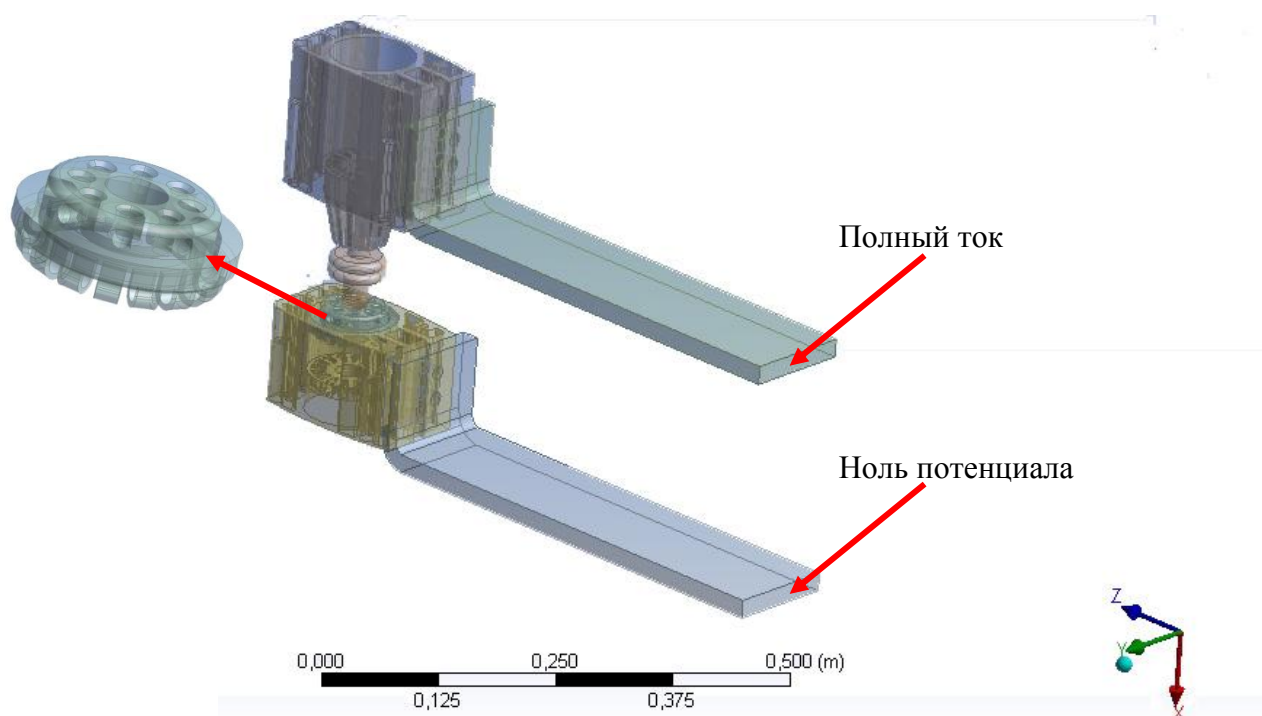


Рис. 46. Геометрия №2

В целом, геометрия модуля №2 отличается от №1 только размером своих элементов. В КМ на ток 3150 А терминалы изготовлены массивными и имеют радиаторные отверстия для лучшего охлаждения.

### 7.2.2. Сетка

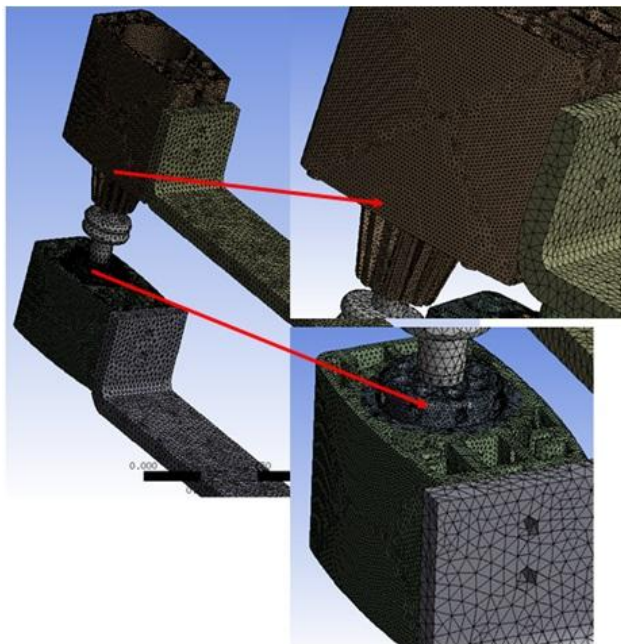


Рис. 47. Сетка в модели №2

Граничные условия аналогичны задаче с КМ №1.

### 7.2.3. Решение и результаты

На рис. 48, 49 представлены распределения модуля плотности тока, а в таблице 9 приведены коэффициенты увеличения сопротивлений для элементов КМ №2.

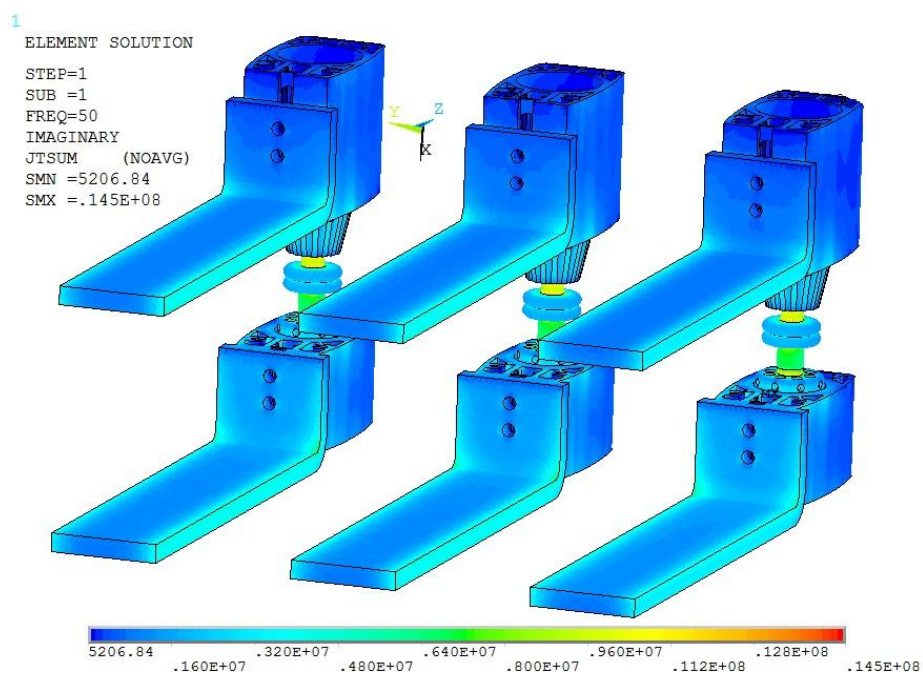


Рис. 48. Распределение модуля плотности тока в модели №2

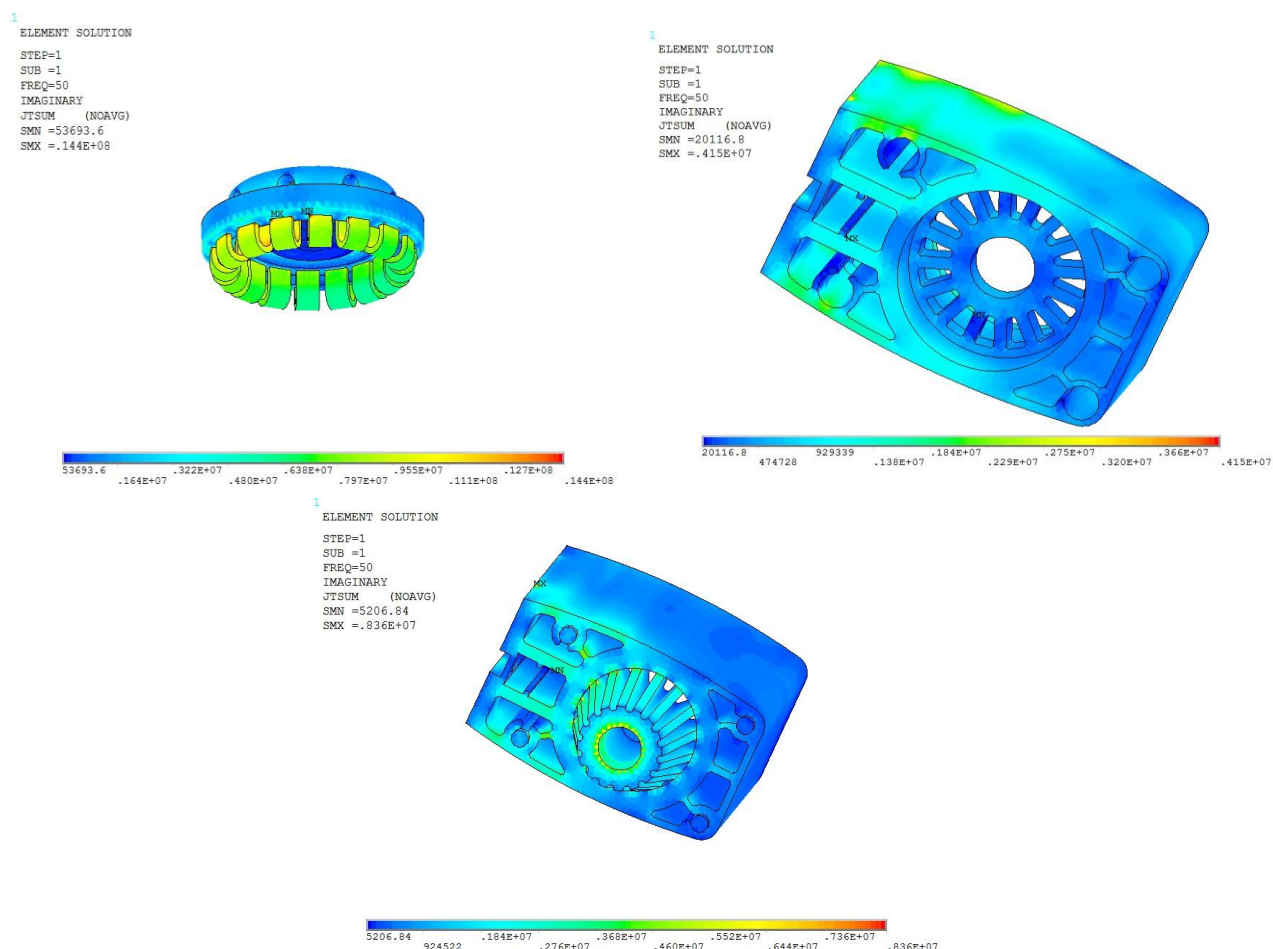


Рис. 49. Распределение модуля плотности тока для элементов КМ №2

|                      |   | Коэффициент увеличения сопротивления |
|----------------------|---|--------------------------------------|
| Верхний терминал     | A | 1.57                                 |
|                      | B | 1.58                                 |
|                      | C | 1.57                                 |
| Гибкий токосъем (ГТ) | A | 1.07                                 |
|                      | B | 1.07                                 |
|                      | C | 1.08                                 |
| Нижний терминал      | A | 1.44                                 |
|                      | B | 1.48                                 |
|                      | C | 1.42                                 |

Таблица 8. Коэффициенты увеличения сопротивлений отдельных элементов КМ №2

В случае №2 коэффициенты увеличения сопротивления в терминалах значительно больше, что связано с их большими размерами. Увеличением эффективного сопротивления в 1.5 раза нельзя пренебречь, т.к. это приведет к существенному увеличению перегрева конструкции.

### 7.3. Выводы

- Расчет показал, что возникающие в коммутационном модуле №1 скин-эффект и эффект близости оказывают малое влияние на распределение плотности тока.
- В отличие от коммутационного модуля №1 в №2 магнитными эффектами нельзя пренебречь из-за их существенного влияния.
- Расчеты скин-эффекта и эффекта близости важны, т.к. в зависимости от конструкции магнитные эффекты будут проявляться в большей или меньшей степени.

## 8. Выводы

Проведено исследование влияния низкочастотного переменного магнитного поля на элементы высоковольтных аппаратов: шины, металлические оболочки, элементы КМ. В ходе работы были объяснены полученные распределения тока и магнитного поля. Был проанализирован эффект асимметрии в распределениях при протекании трехфазного тока, получены коэффициенты увеличения сопротивлений для различных конфигураций шин, оценено влияние металлической оболочки. Для двух КМ были рассчитаны коэффициенты увеличения сопротивлений их основных элементов.

Данный метод учета скин-эффекта может быть использован для дачи рекомендаций при проектировании высоковольтных аппаратов:

- При конструировании необходимо учесть то, что при различном расположении шин (горизонтально или вертикально) изменяется величина скин-эффекта, которую характеризует рассчитанный коэффициент увеличения эффективного сопротивления. В зависимости от количества шин в пакете и от их конфигурации может наблюдаться различная зависимость от межцентрового расстояния между шинами. Используя приведенный метод моделирования, можно определить оптимальную конфигурацию и расположение шин.
- Шины рекомендуется располагать вертикально для минимизации возникающего скин-эффекта и эффекта близости.
- Металлические оболочки лучше располагать дальше от токоведущих частей высоковольтных аппаратов либо учитывать их воздействие, т.к. они оказывают влияние на распределение тока и увеличивают возникающий скин-эффект.
- Учет скин-эффекта, описанный в данной работе, позволяет также производить расчеты с 3D моделями высоковольтных аппаратов. Прежде чем изготавливать КМ или другой высоковольтный аппарат, необходимо оценить возникающий в нем скин-эффект и эффект близости, т.к. в зависимости от геометрии эти эффекты могут иметь существенный или незначительный вклад в увеличение эффективного сопротивления. На примере КМ №2 видно, что из-за большого размера терминалов, их сопротивление увеличивается более чем в 1.5 раза.
- Перед изготовлением нового высоковольтного аппарата, нужно подбирать геометрию не только исходя из лучшего охлаждения, но также оценивать скин-эффект, который возникнет в этой конструкции. При увеличении терминалов и их радиаторных отверстий для более эффективного охлаждения, увеличивается и их эффективное

сопротивление, поэтому для минимизации нагрева конструкции необходимо учитывать.

## 9. Список литературы

1. Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М. Электродинамика сплошных сред. — М.: Наука, 1982. — («Теоретическая физика», том VIII)
2. A. Ducluzaux, Pertes supplementaires dans les conducteurs pour forte intensite par effet de peau st de proximite (Extra losses caused in high current conductors by skin and proximity effects), Cahier technique No. 83 Schneider Electric
3. I. C. Popa, A.-I. Dolan, “Numerical modeling of three-phase busbar systems: Calculation of the thermal field and electrodynamic forces“, International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 2016
4. A. Canova., L. Giaccone, “Numerical and Analytical Modeling of Busbar Systems”, IEEE Transactions on Power Delivery, 2009
5. K. Kasaš-Lažeticr and M. Prša, “Proximity effect against skin effect in two coupled U-shaped busbars”, Simpozijum INFOTEH Jahorina, Jahorina, BiH, 2009
6. K. Kasaš-Lažeticr and M. Prša, “Proximity effect against skin effect in two coupled U-shaped busbars – attempt II”, in 9th International Conference on Applied Electromagnetics PES 2009
7. Tatyana R. Radeva, Ivan S. Yatchev, Dimitar N. Karastoyanov, Nikolay I. Stoimenov, Stanislav D. Gyoshev, “Coupled Electromagnetic and Thermal Field Modeling of a Laboratory Busbar System”, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 2014
8. Xiaoting Dong, Raimund Summer, Uwe Kaltenborn “Thermal network analysis in MV GIS design“, 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2009
9. M. Cao, P. P. Biringer, “Asymmetry in bus bars due to proximity effects”, Journal of Applied Physics, 1990
10. Plsson, Magns r Jnsson, “Finite element analysis of proximity effects in Sderberg electrodes”, 2000
11. H. L. Larsen “Current Distribution in the Electrodes of Industrial Three-phase Electric Smelting Furnaces“, Nordic COMSOL Conference, 2006
12. Mateusz Bedkowski, Jacek Smolka, Krzysztof Banasiak, Zbigniew Bulinski, Andrzej J. Nowaka, Tomasz Tomanekc, Adam Wajdac, “Coupled numerical modelling of power loss generation in busbar system of low-voltage switchgear”, International Journal of Thermal Sciences, 2014
13. Comsol Multiphysics AC/DC Module User’s Guide, 2013

## Приложение 1

### Коэффициенты увеличения сопротивления для шин, использующихся в разных аппаратах

В данном приложении приводятся данные для шин, которые устанавливаются в различных высоковольтных аппаратах, рассчитанных на разный номинальный ток (табл. 9).

| Межц. расст., мм | Ток, А | Ширина, мм | Высота, мм | Примечание  | Ка   | Kb   | Kc   |
|------------------|--------|------------|------------|-------------|------|------|------|
| 150-275          | 400    | 3          | 40         | -           | 1.01 |      |      |
|                  | 630    | 5          | 50         |             | 1.03 |      |      |
|                  | 800    | 6          | 60         |             | 1.05 |      |      |
|                  | 1000   | 8          | 60         |             | 1.08 |      |      |
| 150              | 1250   | 8          | 80         | -           | 1.12 |      |      |
| 210-275          |        |            |            |             | 1.13 |      |      |
| 150              | 1600   | 10         | 100        | -           | 1.19 |      |      |
| 210              |        |            |            |             | 1.20 | 1.19 | 1.20 |
| 250,275          |        |            |            |             | 1.20 |      |      |
| 150              |        |            |            |             | 1.22 | 1.21 | 1.21 |
| 210              | 2000   | 10         | 120        | -           | 1.23 | 1.22 | 1.22 |
| 250,275          |        |            |            |             | 1.23 |      |      |
| 150              |        |            |            |             | 1.46 | 1.59 | 1.46 |
| 210              | 2500   | 10x2       | 100        | зазор 10 мм | 1.46 | 1.52 | 1.46 |
| 250              |        |            |            |             | 1.45 | 1.50 | 1.45 |
| 275              |        |            |            |             | 1.45 | 1.49 | 1.45 |
| 150              |        |            |            |             | 1.50 | 1.74 | 1.50 |
| 210              | 3150   | 10x2       | 120        | зазор 25 мм | 1.49 | 1.61 | 1.49 |
| 250              |        |            |            |             | 1.49 | 1.57 | 1.49 |
| 275              |        |            |            |             | 1.48 | 1.55 | 1.48 |
| 150              |        |            |            |             | 1.95 | 2.35 | 1.96 |
| 210              | 4000   | 10x3       | 120        | зазор 10 мм | 1.92 | 2.13 | 1.92 |
| 250              |        |            |            |             | 1.91 | 2.05 | 1.91 |
| 275              |        |            |            |             | 1.90 | 2.02 | 1.90 |

Таблица 9. Коэффициенты увеличения сопротивлений для шин разного сечения